
From: N H Lewis <nhlewis@btinternet.com>
Sent: Wednesday, August 6, 2025 10:43 AM
To: 'Judith Curry'; 'Ross McKittrick'; 'John Christy'; 'Roy Spencer'; 'Steven Koonin'
Cc: nhlewis@btinternet.com
Subject: FW: Carbon Brief factcheck - your study has been cited in new US DoE 'critical review'
Attachments: Guidelines for contributors to Carbon Brief's DOE report factcheck.pdf; AP Inquiry - Your Input on GHG Endangerment Rescission Science (9.76 KB)

Dear All

I expect that you are all aware of Carbon Brief's activities in relation to your recent DOE Climate Working Group review report, but just in case you aren't here is a copy of their recent email, presumably sent to all climate scientists with papers cited in your report.

I've now had a similar email from Michael Phillis at The Associated Press (copy attached). He and their Seth Borenstein have decided to ask a number of questions of the authors of every science-oriented reference in both the actual EPA proposal and the Department of Energy Climate Working Group's review report about the EPA's proposed rescinding the 2009 Endangerment Finding.

All the best,
Nic

From: Leo Hickman [mailto:leo.hickman@carbonbrief.org]
Sent: 05 August 2025 13:23
To: Leo Hickman
Subject: Carbon Brief factcheck - your study has been cited in new US DoE 'critical review'

Hello,

I'm contacting you because we have noticed that at least one of your studies has been cited in a new report published this week by the US Dept of Energy titled, "A Critical Review of Impacts of Greenhouse Gas Emissions on the U.S. Climate."

A number of scientists cited in the report have already publicly highlighted that their findings have been falsely or misleadingly characterised. It seems that the report is intended to be used as scientific justification by the Trump administration in its efforts to revoke the US Environmental Protection Agency's "endangerment finding" on greenhouse gases.

Carbon Brief is now seeking your help to assess whether your own study, or indeed your area(s) of expertise more widely, have been mischaracterised in the report. This is part of a wider 'crowdsourced' fact-checking effort we are now convening to draw on inputs from experts in their respective fields.

I have attached a PDF with some instructions on how you can participate with your own insights and reflections, should you wish. (The instructions include ways to do this anonymously and securely, if that is your preference.)

Additionally, if you know of a colleague or co-author who might wish to participate, please feel free to forward

this email to them.

Our deadline for submissions is Monday 11 August 2025 - 0900 GMT.

Many thanks in advance.

Best wishes, Leo

--

Leo Hickman

Editor, Carbon Brief

Phone: + 44 (0) 7731 403979

Social: Twitter; BlueSky; LinkedIn

Web: www.carbonbrief.org

Need a digest of the latest climate change-related headlines sent to your inbox? You can sign up to Carbon Brief's free daily, weekly, Cropped and China Briefing newsletters here.



Guidelines for contributors to Carbon Brief's DOE 'climate working group' report factcheck

Key documents

- [The report](#) – please use this version for all referencing. Lines are numbered down the left-hand margin. Please use the page number of this PDF version of the document.
- [Spreadsheet](#) for contributors (3 max per section) to register their interest in factchecking sections
- [Contributor spreadsheet](#). This is a template; each contributor should create their own copy, complete it and return it to Carbon Brief.

Step one

Register your interest in the factcheck.

Please use our [shared spreadsheet](#) to identify which section/s of the report you would like to comment on. Add your name to the column of the relevant tab.

(We do not need comments on the introduction from Chris Wright.)

If you would prefer to communicate this to us via Signal rather than a shared Google Sheet, please message CB editor Leo Hickman via +447731403979.

If you would prefer to remain anonymous, please let us know and we can mark your sections in the spreadsheet on your behalf, using a pseudonym.

Step two

Email science@carbonbrief.org confirming you have filled out the "identify which section/s you wish to comment on" spreadsheet.

Or, as mentioned above, send a Signal to Leo Hickman.

Step three

Download the [contributor spreadsheet](#).

Please *save a copy* with your full name in the file name, or your pseudonym if remaining anonymous.

Step four

Fill the contributor's spreadsheet. Contributors should:

- Identify the statements/statistics or figures being factchecked. Copy the relevant text from the report into the spreadsheet. Identify its page and line numbers, as found in [this document](#), or the Figure number as appropriate.
- Enter up to 150 words of comment/rebuttal in the "factcheck" column. Please keep this as clear, concise and objective as possible – and link to sources (see bullet below). Please avoid personalised remarks about authors, etc.
- Select a rating in the drop-down menu. The options are:
 - **FALSE** – for statements/statistics that are factually incorrect or untrue.
 - **MISLEADING** – for statements/statistics that are presented in a way that distort the meaning, create a false impression or omit/cherry-pick crucial details.

The rating of statements/statistics as "misleading" or "false" will allow Carbon Brief to create a visual overview of the DOE report with false/misleading colour scoring – creating an effect similar to this [New York Times](#) piece.

- Add the links to sources that back up your rebuttal in the final columns of the spreadsheet. If you need to add more than three, please create new columns to the right. Wherever possible, please cite peer-reviewed sources.
- If references cited in the DOE report are incorrect, or misleadingly used, please flag this in the spreadsheet – ideally, against the line where they are cited in the report's main text.

Step five

Send your spreadsheet back to Carbon Brief via email or Signal.

Deadline: Monday 11 August 2025 - 0900 GMT

From: Phillis, Michael <MPhillis@ap.org>
Sent: Tuesday, August 5, 2025 5:31 PM
To: nhlewis@btinternet.com
Subject: AP Inquiry - Your Input on GHG Endangerment Rescission Science

Hello,

We're Seth Borenstein and Michael Phillis, reporters on the climate and environment team at The Associated Press. As you know last week, the Trump administration's EPA proposed rescinding the 2009 Endangerment Finding on climate change. It did so with two documents. One was the actual EPA proposal and the other was the Department of Energy Climate Working Group's "A Critical Review of Impacts of Greenhouse Gas Emissions on the U.S. Climate." We have decided to ask the authors of every science-oriented reference in both documents about this. That's why we are contacting you.

We've included links to both documents. Yes, they are long and we are sorry for that. Below you will see the page or chapter where your work was referenced for an easier guide.

Can you please by August 12, read these documents – or as much of the pertinent parts as you deem – and send us your thoughts and answer a few of the questions below.

We are purely looking at the science parts of these documents and that's what we seek your thoughts on. **In the EPA document**, most of the overall science is from pages 75 (on the pdf reader at the top) through 85. We've also included **EPA decision science highlights**, but it may not be too comprehensive. Please tell us if we are missing something. **The DOE document** is mostly aimed at the science and its organization is fairly straightforward and it has an executive summary at the beginning. We are contacting well more than 100 scientists and experts like yourself to get a broad sense of the documents' scientific accuracy so not everyone who answers will be quoted but if you do answer, and we would be appreciative, you will definitely help guide us to write a story with depth and authority.

You are referenced in: DOE Chapter 4, DOE Chapter 4, DOE Chapter 8, DOE Chapter 11

So now our questions:

What do you think of the overall quality of the DOE and EPA reports?

Did the sections of the report(s) that cited your work accurately and fairly portray it? Please elaborate.

Do the overall conclusions of the documents accurately portray the overall conclusions of your general body of work? Please explain why or why not.

Does the overall work and conclusions of the documents accurately portray the current, mainstream view of climate science? Please feel free to give details and explain what you consider important or not about this.

Was the selection of sources sufficiently current and representative of the best available science?

Do you consider the work and conclusions of the document to be biased in any way, or not? Please explain with examples.

On a scale of 0 to 100 with 100 being the best, how would you rate the EPA report? What about the DOE report?

If you were teaching an undergraduate class and your student delivered the EPA document as an assignment, what grade on the standard A to F scale would you give it? Why?

If you were teaching an undergraduate class and your student delivered the DOE document as an assignment, what grade on the standard A to F scale would you give it? Why?

Any other thoughts?

Thank you for your time and insight.

Sincerely,
Seth and Michael

The information contained in this communication is intended for the use of the designated recipients named above. If the reader of this communication is not the intended recipient, you are hereby notified that you have received this communication in error, and that any review, dissemination, distribution or copying of this communication is strictly prohibited. If you have received this communication in error, please notify The Associated Press immediately by telephone at +1-212-621-1500 and delete this email. Thank you.

From: Ross McKittrick [ross.mckittrick@gmail.com]
Sent: 7/31/2025 4:27:24 PM
To: Roy W. Spencer [roywspencer@hotmail.com]; Judith Curry [curry.judith@gmail.com]; John Christy [climateman60@gmail.com]; Steven Koonin [steven.koonin@gmail.com]; Josh Loucks [loucksj14@gmail.com]; Cohen, Seth [seth.cohen@hq.doe.gov]; Fisher, Travis [travis.fisher@hq.doe.gov]
Subject: Fwd: Fw: Carbon Brief factcheck - your study has been cited in new US DoE 'critical review'

John and I got this from Tim Vogelsang at MSU. Carbon Brief is contacting everyone whose work was cited trying to gather up claims of misrepresentation. As Tim notes, there is no option on the form for saying your work was correctly characterized.

From: Vogelsang, Timothy <tjv@msu.edu>
Sent: Thursday, July 31, 2025 12:19 PM
To: Ross McKittrick <rmckitri@uoguelph.ca>; John Christy <climateman60@gmail.com>
Subject: RE: Carbon Brief factcheck - your study has been cited in new US DoE 'critical review'

CAUTION: This email originated from outside of the University of Guelph. Do not click links or open attachments unless you recognize the sender and know the content is safe. If in doubt, forward suspicious emails to IThelp@uoguelph.ca.

If you look at the pdf I was sent with the instructions, there is no option to report that someone's research has been correctly characterized. That's not a very scientific factchecking exercise, is it!

Tim

From: Ross McKittrick <rmckitri@uoguelph.ca>
Sent: Thursday, July 31, 2025 12:15 PM
To: Vogelsang, Timothy <tjv@msu.edu>; John Christy <climateman60@gmail.com>
Subject: Re: Carbon Brief factcheck - your study has been cited in new US DoE 'critical review'

I've heard of Carbon Brief but only read snippets of their articles cited elsewhere. They seem to be heavily into promoting renewables.

It's interesting to watch the machine swing into gear. There is a public comment docket opening up and I expect there will be quite the avalanche of material submitted, which we will need to prepare responses to, all of which will form part of the public record. If the comments are substantive we'll readily make revisions. We responded to a lot of comments from the internal DoE staff during the pre-publication review stage. But some of the most hostile comments didn't provide any data or citations in support so we couldn't do anything with them.

Ross

Dr. Ross McKittrick
Professor of Economics
Department of Economics and Finance
rossmckittrick.com

From: Vogelsang, Timothy <tjv@msu.edu>
Sent: Thursday, July 31, 2025 12:02 PM
To: Ross McKittrick <rmckitri@uoguelph.ca>; John Christy <climateman60@gmail.com>
Subject: FW: Carbon Brief factcheck - your study has been cited in new US DoE 'critical review'

CAUTION: This email originated from outside of the University of Guelph. Do not click links or open attachments unless you recognize the sender and know the content is safe. If in doubt, forward suspicious emails to IThelp@uoguelph.ca.

Ross and John,

I just got this email. Maybe you know about this group. I'm sure this is just the tip of the iceberg of pushback coming.

Tim

From: Leo Hickman <leo.hickman@carbonbrief.org>
Sent: Thursday, July 31, 2025 11:49 AM
To: Leo Hickman <leo.hickman@carbonbrief.org>
Subject: Carbon Brief factcheck - your study has been cited in new US DoE 'critical review'

Hello,

I'm contacting you because we have noticed that at least one of your studies has been cited in a new report published this week by the US Dept of Energy titled, "A Critical Review of Impacts of Greenhouse Gas Emissions on the U.S. Climate."

A number of scientists cited in the report have already publicly highlighted that their findings have been falsely or misleadingly characterised. It seems that the report is intended to be used as scientific justification by the Trump administration in its efforts to revoke the US Environmental Protection Agency's "endangerment finding" on greenhouse gases.

Carbon Brief is now seeking your help to assess whether your own study, or indeed your area(s) of expertise more widely, have been mischaracterised in the report. This is part of a wider 'crowdsourced' fact-checking effort we are now convening to draw on inputs from experts in their respective fields.

I have attached a PDF with some instructions on how you can participate with your own insights and reflections, should you wish. (The instructions include ways to do this anonymously and securely, if that is your preference.)

Additionally, if you know of a colleague or co-author who might wish to participate, please feel free to forward this email to them.

Our deadline for submissions is Monday 11 August 2025 - 0900 GMT.

Many thanks in advance.

Best wishes, Leo

--

Leo Hickman

Editor, Carbon Brief

Phone: + 44 (0) 7731 403979

Social: Twitter; BlueSky; LinkedIn

Web: www.carbonbrief.org

Need a digest of the latest climate change-related headlines sent to your inbox? You can sign up to Carbon Brief's free daily, weekly, Cropped and China Briefing newsletters [here](#).

From: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>
Sent: Friday, August 15, 2025 9:12 AM
To: Ison, Jeremy T.; Steve Koonin; John Christy; Ross McKittrick; Roy Spencer
Subject: Fwd: Hungarian translation of the DOE Climate Report
Attachments: TELJES_FORDITAS_2025_08_14.pdf

Hello Jeremy, do you see any problem with this? If we receive similar requests, do we have permission to approve? Thanks

----- Forwarded message -----

From: Szarka László <szarka@ggki.hu>
Date: Fri, Aug 15, 2025 at 6:01 AM
Subject: Hungarian translation of the DOE Climate Report
To: <curry.judith@gmail.com>, <steven.koonin@gmail.com>, <christy@nsstc.uah.edu>, <roy.spencer@nsstc.uah.edu>, <ross.mckittrick@gmail.com>

curry.judith@gmail.com
steven.koonin@gmail.com
christy@nsstc.uah.edu
roy.spencer@nsstc.uah.edu
ross.mckittrick@gmail.com

Dear Authors!

On behalf of the Hungarian "climate and energy" scientific community (which primarily includes the Energy Working Group of the Batthyány Society of Professors but also the Hungarian signatories of Clintel' WCD), I would like to express my great gratitude for the groundbreaking climate report that you have prepared: A Critical Review of Impacts of Greenhouse Gas Emissions on the U.S. Climate.

Short excerpts (the introductions and chapter summaries) have already been published in my translation by a Hungarian weekly magazine (<https://demokrata.hu/tudomany/a-szen-dioxid-nem-ellenseg-hanem-barat-1036812/>). This magazine has published interviews with among others Richard Lindzen and Samuel Furfari).

The Hungarian translation of the full report is now complete. Attached I am sending the version that is still under review. I will send it as a working document to Hungarian colleagues. I am uncertain about the issue of online publishing the Hungarian version, because it is stated at the beginning of the report that "This report is disseminated by the Department of Energy".

I respectfully ask if there is any obstacle for us (Batthyány Society of Professors, PBK) this Hungarian translation on our website? We would like to shape the thinking of the Hungarian public, and the decision

makers, of course.

I would like to offer the DOE to publish the report in Hungarian (and then perhaps the final version) I am aware, I can write a letter to an official address (DOEGeneralCounsel@hq.doe.gov), but before that I would like to ask for your opinion, and, if possible, your consent.

The President of the Hungarian Academy of Sciences has made a verbal promise that the Hungarian Academy of Sciences is willing to organize a climate debate that will include both pro and con views. In this context I respectfully ask if there is a chance that you would be able to come to Hungary this year or next year

Yours sincerely:

László Csaba SZARKA, Geophysicist, Member of the Hungarian Academy of Sciences,
Chair of the PBK Energy Working Group, Clintel Ambassador, Hungary

Co-author of two articles cited in the DOE report (Connolly et al. 2021 and Soon et al 2023), and reviewer of the Hungarian edition of Koonin's "Unsettled"

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

Az üvegházgáz-kibocsátás USA-ra vonatkozó éghajlati hatásainak kritikai felülvizsgálata

Az USA energiaügyi minisztere számára amerikai klímakutatók által a klímaváltozás „oktulatádonításáról” készített jelentés magyar fordítása

Bevezető a magyar változathoz

Az Amerikai Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma megbízására öt neves kutató újraértékelte az energetikai zöldátállás klímaváltozási megokolásának alapjait. A mintegy 150 oldal terjedelmű, gyökeres szemléletváltásról tanúskodik. (Link: https://www.energy.gov/sites/default/files/2025-07/DOE_Critical_Review_of_Impacts_of_GHG_Emissions_on_the_US_Climate_July_2025.pdf).

E magyar fordítás a 2025. július 23-ai keltezésű USA-dokumentumot (a miniszteri előszót, a vezetői összefoglalót, a szerzők (John Christy, Judith Curry, Steven Koonin, Ross McKittrick, Roy Spencer) által írt bevezetőt, valamint a dokumentum tizenkét fejezetét is tartalmazza).

A világban ma uralkodó nézet szerint a jelenlegi klímaváltozást – a felmelegedést és az időjárási szélsőségek fokozódását – az légköri üvegházgáz-koncentráció emelkedése okozza, aminek fő oka az emberi CO₂-kibocsátás. A klímaegyezményeken keresztül az országok többsége elfogadta, hogy a CO₂-kibocsátást a légköri üvegházgáz-koncentráció további növekedésének megállítása, majd későbbi csökkentése, ezáltal a klímaváltozás jövőbeli mérséklése érdekében korlátozni kell. A klímaegyezményben résztvevő országok arra is kötelezték magukat, hogy előkészítik az egyének, a közösségek, az élőhelyek, a létesítmények és összességében a társadalom alkalmazkodását, hogy a megváltozó klíma hatásai kevésbé legyenek negatívak. Ez az ENSZ, a Világgazdasági Fórum, az Európai Unió „hivatalos” világnézete.

A fenti gondolatmenet egyes lépéseivel és egészével kapcsolatban kezdettől fogva fogalmazódtak meg jogos tudományos kritikák, mégis nagyon sokan elfogadják (nemzetközi szinten és Magyarországon egyaránt). Ma, a 2020-as évek közepén, a dekarbonizáció erőltetett fázisában újra elkezdett nőni azok száma, akik – észlelve az energiaátállás költségeit és csapdáit – megkérdőjelezzik az erőltetett zöldátállást, ugyanakkor elfogadják, hogy a földi léghajlatot az ember „tönkretette”. Végül vannak olyan következetes gondolkodók (például a holland Clintel, a német EIKE, a brit GWPF, Magyarországon többek között a Professzorok Batthyány Köre energia-munkacsoportjának természettudományi-műszaki tagjai vonzáskörében), akik képesek a vitatott kérdéseket rendszerbe foglalni, és megalapozott ellenvéleményüket hangoztatni. Mindez azonban mindeddig Don Quijote-i küzdelemnek, falra hányt borsónak tűnt.

Örvendetes, sőt valóságos csodaszámba megy, hogy az USA energiaügyi minisztere számára készített amerikai tanulmány nem frázisokat puffogat, hanem higgadtan érvel. A szerzőtársak óvatosan, körültekintően fogalmaznak (különösen a vezetői összefoglalóban), mégis ízekre szedik a dogmát (és anélkül, hogy a CO₂ szerepét alapjaiban megkérdőjeleznék).

Az amerikai tanulmány világszerte – így remélhetőleg Magyarországon, többek között a Magyar Tudományos Akadémián is – új lendületet adhat az energetikai zöldátállásról, a klíma-energia-környezet összetett kérdésköréről folyó, nagyon is szükséges tudományos vitáknak.

A címloldal magyar fordítása:

Az üvegházgáz-kibocsátás USA-ra vonatkozó hatásainak kritikai felülvizsgálata

Jelentés Christopher Wright amerikai energiaügyi miniszter számára
2025. július 23.

Klímaváltozási Munkacsoport:

John Christy, PhD

Judith Curry, PhD

Steven Koonin, PhD

Ross McKittrick, PhD

Roy Spencer, PhD

Ezt a jelentést az Energiaügyi Minisztérium terjeszti. Mint ilyen, e dokumentum a 2001-es költségvetési évre vonatkozó kincstári és általános kormányzati előirányzatokról szóló törvény (106-554. számú közjog) 515. szakaszának és az Energiaügyi Minisztérium által kiadott információminőségi irányelveknek megfelelően készült.

Copyright © 2025 Egyesült Államok

Javasolt hivatkozás:

Klímaváltozási Munkacsoport (2025): Az üvegházgáz-kibocsátás USA-ra vonatkozó éghajlati hatásainak kritikai felülvizsgálata. Washington DC: Energiaügyi Minisztérium, 2025. július 23.

A Jelentés tartalomjegyzéke:

MINISZTERI ELŐSZÓ

VEZETŐI ÖSSZEFOGLALÓ

BEVEZETŐ

I. RÉSZ: KÖZVETLEN EMBERI HATÁS AZ ÖKOSZISZTÉMÁRA ÉS A KLÍMÁRA

1 A SZÉN-DIOXID, MINT SZENNYEZŐANYAG

2 A CO₂ KÖZVETLEN HATÁSA A KÖRNYEZETRE

2.1 A CO₂ MINT A GLOBÁLIS ZÖLDÜLÉSHEZ HOZZÁJÁRULÓ TÉNYEZŐ

2.1.1 A globális zöldülés mérése

2.1.2 Fotoszintézis és CO₂-szint

2.1.3 Növekvő CO₂- és növényi vízfelhasználási hatékonyság

2.1.4 A CO₂-trágyázás előnyei az IPCC-jelentésekben

2.2 A LÚGOS ÓCEÁNOK

2.2.1 A pH változása

2.2.2 Korallzátony-változások

3 AZ EMBER HATÁSA AZ ÉGHAJLATRA

3.1 A SUGÁRZÁSI KÉNYSZER ÖSSZETEVŐI ÉS TÖRTÉNETÜK

3.1.1 Történelmileg ismert sugárzási kényszer

3.1.2 A légköri CO₂ változása 1958 óta

3.2 JÖVŐBENI KIBOCSÁTÁSI FORGATÓKÖNYVEK ÉS A SZÉNCIKLUS

3.2.1 Kibocsátási forgatókönyvek

3.2.2 A kibocsátásokhoz és koncentrációkhoz kapcsolódó szénciklus

3.3 AZ URBANIZÁCIÓ HATÁSA A HŐMÉRSÉKLETI TRENDRE

II. RÉSZ: A CO₂-KIBOCSÁTÁSRA ADOTT KLÍMAVÁLASZ

4 A CO₂-KÉNYSZER KLÍMAÉRZÉKENYSÉGE

4.1 BEVEZETÉS

4.2 A KLÍMAÉRZÉKENYSÉG MODELLALAPÚ BECSLÉSE

4.3 A KLÍMAÉRZÉKENYSÉG ADATALAPÚ BECSLÉSE

4.4 TRANZIENS KLÍMAÉRZÉKENYSÉG

5 ELTÉRÉSEK A MODELLEK ÉS A MŰSZERES MEGFIGYELÉSEK KÖZÖTT

5.1 BEVEZETÉS

5.2 FELSZÍNI MELEGEDÉS

5.3 TROPOSZFÉRIKUS MELEGEDÉS

5.4 ELTÉRÉSEK A FÜGGŐLEGES HŐMÉRSÉKLET-PROFIL MENTÉN

5.5 SZTRATOSZFÉRIKUS HŰLÉS

5.6 ELTÉRÉSEK A HÓTAKARÓBAN

5.7 A PLANETÁRIS ALBEDÓ FÉLGÖMBI SZIMMETRIÁJA

5.8 AZ USA KUKORICAÖVEZETE

6. SZÉLSŐSÉGES IDŐJÁRÁS

6.1 BEVEZETÉS

6.2 HURRIKÁNOK ÉS TRÓPUSI CIKLONOK

6.3 HŐMÉRSÉKLETI SZÉLSŐSÉGEK

6.3.1 Az Egyesült Államokban a hőmérséklet egyre kevésbé szélsőséges

6.3.2 Hőközöb-tülpépések

6.3.3 Hőhullámok

6.4 SZÉLSŐSÉGES CSAPADÉK

6.5 TORNÁDÓK

6.6 ÁRVÍZEK

6.7 SZÁRAZSÁG

6.8 FUTÓTÜZEK

7 TENGERSZINTVÁLTOZÁSOK

7.1 GLOBÁLIS TENGERSZINT-EMELKEDÉS

7.2 AZ USA TENGERSZINT-EMELKEDÉSE

7.3 A VÁRHATÓ TENGERSZINT-EMELKEDÉS

8 BIZONYTALANSÁGOK A KLÍMAVÁLTOZÁS HATÁSÁNAK MEGHATÁROZÁSÁBAN

8.1 BEVEZETÉS

8.2 OKTULAJDONÍTÁSI MÓDSZEREK

8.3 A GLOBÁLIS FELMELEGEDÉS OKTULAJDONÍTÁSA

8.3.1 Természetes éghajlati változékonyság

8.3.2 Optimális ujjenyomatvétel

8.3.3 Idősoros módszerek

8.4 CSÖKKENŐ BOLYGÓALBEDO ÉS A LEGUTÓBBI REKORMELEGEDÉS

8.5 AZ ÉGHAJLATI HATÓTÉNYEZŐKRE VONATKOZÓ OKTULAJDONÍTÁS

8.6 SZÉLSŐSÉGES ESEMÉNYEKRE (EEA) VONATKOZÓ OKTULAJDONÍTÁS

8.6.1 Esettanulmány – a 2021-es hőhullám Észak-Amerika nyugati részén

III. RÉSZ: HATÁSOK AZ ÖKOSZISZTÉMÁKRA ÉS A TÁRSADALOMRA

9 KLÍMAVÁLTOZÁS ÉS AZ USA MEZŐGAZDASÁGA

9.1 ÖKONOMETRIAI ELEMZÉSEK

9.2 A CO₂-DÚSULÁS TEREPI ÉS LABORATÓRIUMI ELEMZÉSE

9.3 TERMÉSMODELLEZÉSI METAELMÉZÉSEK

9.4 A CO₂-TRÁGYÁZÁS ÉS A TÁPANYAGVESZTÉS

10 A SZÉLSŐSÉGES IDŐJÁRÁS KOCKÁZATKEZELÉSE

10.1 TÁRSADALMI-GAZDASÁGI HÁTTÉR

10.2 AZ ADATOK ÁLTAL JELENTETT KIHÍVÁSOK

10.3 HALÁLOZÁS A HŐMÉRSÉKLETI SZÉLSŐSÉGEK MIATT

10.3.1 Hőség- és hidegkockázatok

10.3.2 Halálozási kockázatok és energiaköltségek

11 A KLÍMAVÁLTOZÁS, A GAZDASÁG, VALAMINT A SZÉN TÁRSADALMI KÖLTSÉGE

11.1 KLÍMAVÁLTOZÁS ÉS GAZDASÁGI NÖVEKEDÉS

11.1.1 Áttekintés

11.1.2 Az éghajlatváltozás és a gazdasági növekedés adatalapú elemzése

11.2 MODELLEK A SZÉN TÁRSADALMI KÖLTSÉGÉRE (SCC)

11.2.1 Az SCC becslése

11.2.2 Az SCC változásai

11.2.3 Alacsony SCC-re vonatkozó bizonyítékok

11.2.4 Fordulópontok

11.2.5 Vannak-e alternatívák?

12 AZ USA KIBOCSÁTÁSI POLITIKÁINAK GLOBÁLIS ÉGHAJLATI HATÁSAI

12.1 A LÉPTÉKPROBLÉMA

12.2 ESETTANULMÁNY: AZ USA-GÉPJÁRMŰVEK KIBOCSÁTÁSA

12.3 ZÁRÓGONDOLATOK

SZÓJEGYZÉK

ÁBRÁK ÉS TÁBLÁZATOK METAADATAI

A SZERZŐKRŐL

MINISZTERI ELŐSZÓ

Az energia, az integritás és az emberi potenciál ereje

Egész életem során kiváltságos helyzetben volt részem: számos területen dolgozhattam energiaipari vállalkozóként (atomenergia, geotermikus energia, földgáz és egyebek), jelenleg pedig Donald Trump elnök alatt szolgálok energiaügyi miniszterként. De mindenekelőtt fizikus kutató vagyok, aki a modern energiát csodás kincsnek tekinti. Ez hajtja a modern élet minden területét, mozgatja az összes iparágat, Amerikát olyan energianagyhatalommá téve, amely képes a globális fejlődés hajtóerejévé válni.

Az emberiség felvirágzása az elmúlt két évszázadban egy ünneplésre méltó történet. Mégis azt hajtogatják nekünk –megállás nélkül –, hogy azok az energiarendszerek, amelyek lehetővé tették ezt a fejlődést, immár létünket fenyegetik. Érvelésük szerint a szénhidrogén alapú üzemanyagokról gyorsan le kell mondani, különben a bolygó pusztulását kockáztatjuk.

E nézet beható vizsgálatot követel. Ebből a célból rendeltem meg a jelentést. Az éghajlatváltozásról és az energiáról jobban átgondolt és tudományosan megalapozott párbeszédet kívánok ösztönözni. Szakmai hátterem birtokában áttekintettem az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC) jelentéseit, az Egyesült Államok kormányainak értékeléseit, valamint a tudományos szakirodalmat. Számos klímakutatóval is kapcsolatba léptem, többek között e jelentés szerzőivel is.

Azt tapasztaltam, hogy a média gyakran eltorzíja a tudományt. A klímaváltozásról sokakban egy eltúlzott, illetve hiányos kép alakítanak ki. Az érthetőség és az egyensúly megteremtése érdekében felkértem egy független szakértőkből álló, sokféle szempontot figyelembe vevő csapatot, hogy kritikusan tekintsék át a klímatudomány jelenlegi helyzetét, különös tekintettel az Egyesült Államokbeli viszonyokra.

Nem azért választottam ezeket a szerzőket, mert mindig egyetértünk – egyáltalán nem. Sőt, lehet, hogy ők sem mindig értenek egyet egymással. Hanem a szigorúságuk, a becsületességük és a vitaszínvonal emelése érdekében választottam őket. Nem gyakoroltam befolyást a következtetéseikre. Amit olvasni fognak, az az ő művük, ami az elérhető legjobb adatokon és tudományos értékeléseken alapul.

A jelentést alaposan átnéztem, és úgy vélem, hogy hűen tükrözi a klímatudomány jelenlegi helyzetét. Ennek ellenére számos olvasó meglepődhet a következtetésein – amelyek lényegi módon eltérnek attól, amit a főszó (a mainstream narratíva) állít. Ez annak a jele, hogy a nyilvánosság előtti párbeszéd a tudománytól nagyon távolra került.

A helyes irány eléréséhez nyílt, tiszteletteljes és tájékozott vitákra van szükség. Ezért erről a jelentésről nyilvános véleményeket kérek. Politikai döntéshozatalunk középpontjában a becsületes vizsgálódásnak és a tudományos átláthatóságnak kell állnia.

Az éghajlatváltozás valós, és figyelmet érdemlő kérdés. De nem ez az emberiség előtt álló legnagyobb fenyegetés. Inkább a globális energiaszegénység érdemelne megkülönböztetett figyelmet. Adatok értékelésével foglalkozom, tudom tehát, hogy az emberi életkörülmények javítása a megbízható, megfizethető energiához való hozzáférés bővítésétől függ. Az éghajlatváltozás ugyan kihívást jelent, de nem katasztrófa! Ami ténylegesen veszélyeztetheti az emberi jólétet, az a tényeket mellőző, félelemre építő, félrevezető szakpolitika.

Az energiairányítás új korszakának küszöbén állunk. Ha az innovációt inkább támogatjuk, mint korlátozzuk, Amerika világvezető szerepet tölthet be a tisztább, bőségesebb energia biztosításában – milliárdokat felemelve a mélyszegénységből, erősítve gazdaságunkat és javítva környezetünket.

VEZETŐI ÖSSZEFOGLALÓ

E jelentés áttekinti mindazokat a tudományos bizonyosságokat és bizonytalanságokat, amelyek arról szólnak, hogy az antropogén szén-dioxid (CO₂) és egyéb üvegházhatású gázok kibocsátása miként befolyásolta, vagy fogja befolyásolni az ország (az USA) éghajlatát, a szélsőséges időjárási eseményeket, valamint a társadalmi jólét egyes mutatóit. E kibocsátás egy összetett és változékony szencikluson keresztül megemeli a légköri CO₂-koncentrációt, és a többlet CO₂ egy része évszázadokig fennmarad a légkörben.

A megemelkedett CO₂-koncentráció közvetlenül elősegíti a növények növekedését, globálisan hozzájárulva a bolygó „zöldüléséhez” és a mezőgazdasági terménynöveléshez [2.1. szakasz, 9. fejezet]. Emellett csökkenti az óceánok lúgosságát (a pH értékét). Lehetséges, hogy káros a korallzátonyokra, bár a Nagy-korallzátony közelmúltbeli felélézése nem erre utal [2.2. szakasz].

A szén-dioxid egyben üvegházhatású gáz is, melegítő hatást gyakorolva az éghajlatra és az időjárásra [3.1. szakasz]. Az éghajlatváltozással kapcsolatos előrejelzésekhez a jövőbeli kibocsátásról forgatókönyvek szükségeltetnek. Bizonyítékok léteznek arra, hogy a klímahatásokkal foglalkozó szakirodalomban széles körben használt forgatókönyvek a megfigyelt és valószínűsíthető jövőbeli kibocsátási trendeket eltúlozzák [3.1. szakasz].

A világban létező több tucatnyi globális klímamodell édeskevés útmutatást ad arra vonatkozóan, hogy az éghajlat milyen mértékben reagál a megemelkedett CO₂-szintre: ezek szerint a CO₂-koncentráció megduplázódása esetén a földfelszínen az átlagos felmelegedés mértéke 1,8°C és 5,7°C között mozog [4.2. szakasz]. Az adatalapú módszerek alacsonyabb és szűkebb tartományt jeleznek [4.3. szakasz]. A globális klímamodellek az elmúlt évtizedek éghajlatát általában „forró” módon írják le – a valóságot eltúlzó felszíni felmelegedést mutatnak, valamint túl nagy felmelegedés-felerősödést az alsó és a középső troposzférában [5.2-5.4. szakaszok]. A túlságosan érzékeny modellek és a jövőbeli kibocsátásokra vonatkozó valószínűtlen, szélsőséges forgatókönyvek kombinációja a jövőben vélt felmelegedési előrejelzésekben nagy túlzásokra vezet.

Az Egyesült Államokban a legtöbb szélsőséges időjárási esemény alakulásában nem mutatkozik hosszú távú tendencia. Az USA történelmi adatai nem támasztják alá a hurrikánok, tornádók, árvizek és aszályok gyakoriság- vagy intenzitás-növekedésére vonatkozó állításokat [6.1-6.7. szakaszok]. Ezenkívül az tűzvész-aktivitás változásainak értékelésekor az erdőgazdálkodási gyakorlatot rendszerint figyelmen kívül hagyják [6.8. szakasz]. A globális tengerszint 1900 óta körülbelül 20 centiméterrel emelkedett, de ebben jelentős regionális eltérések vannak, amiket elsősorban helyi szárazföld-süllyedés okoznak; az amerikai parti tengerszint-mérők (mareográfok) mérésösszesítései nem mutatják, hogy a tengerszint-emelkedés egyértelműen nagyobb ütemű lenne, mint amekkora a történelmi átlag [7. fejezet].

Az éghajlatváltozás vagy a szélsőséges időjárási események emberi CO₂-kibocsátásnak való tulajdonítást (az ún. oktatulajdonítást) a természetes éghajlati változékonyság, az adatok elérhetősége és a modellek eredendő hiányosságai miatt megkérdőjelezhető [8. fejezet]. Ezenkívül az is lehetséges, hogy a naptevékenység 20. század végi felmelegedéshez való hozzájárulása alá lett becsülve [8.3.1. szakasz].

Mind a modellek, mind a tapasztalatok arra utalnak, hogy a CO₂ által kiváltott felmelegedés gazdaságilag minden bizonnyal kevésbé káros, mint azt általában hiszik, és a túlzottan agresszív mérséklési politikák inkább bizonyulhatnak károsnak, mint előnyösnek [9., 10. fejezet, 11.1. szakasz]. A szén-dioxid-kibocsátás társadalmi költségeit számszerűsíteni próbáló gazdasági kárbecslések rendkívül érzékenyek a kiindulási feltételezésekre, ezért információtartalmuk igen korlátozott [11.2. szakasz].

Az USA politikai intézkedései várhatóan kimutathatatlanul kis közvetlen hatással vannak a globális éghajlatra, és bármilyen hatás csak hosszú időkeséssel jelentkezik [12. fejezet]

BEVEZETŐ

E dokumentum keletkezése 2025. március végére vezethető vissza, amikor Wright miniszter összeállított egy független csoportot, hogy jelentés készüljön az energiapolitika-alkotás szempontjából releváns klímatudományi kérdésekről, többek között a közvélekedést megkérdőjelező bizonyítékokról és nézőpontokról. A munka elvégzésébe azzal a feltétellel egyeztünk bele, hogy sem a miniszter, sem az Energiaügyi Minisztérium, sem más kormányzati alkalmazott nem gyakorol szerkesztői felügyeletet. Ezt a feltételt a folyamat során végig betartottuk, és az csoport teljesen függetlenül dolgozott.

A csapat április elején kezdte meg a munkát, május 28-i határidővel, hogy a tervezetet be lehessen nyújtani egy energiaügyi minisztériumi belső felülvizsgálatra. A rövid határidő és az anyag technikai jellege miatt nem tudtunk teljesen átfogó áttekintést adni. Ezért inkább olyan témákra összpontosítottunk, amelyeket a komoly, elismert tudományos szakirodalom is tárgyal; amelyek a feladatunk szempontjából időszerűek; amelyeket a legújabb értékelő jelentések alábecsülnek vagy hiányoznak belőlük; és amelyek a mi kompetenciánkba tartoznak.

Bár a jelentés célja, hogy a nem szakértők számára is érthető legyen, kihagytunk néhány bevezető vagy magyarázó anyagot, ezek másutt könnyen elérhetők. Nem törekedtünk arra sem, hogy áttekintsük a tárgyalt témákhoz tartozó teljes szakirodalmat. Amennyire csak lehetséges volt, a 2020 óta megjelent szakirodalomra összpontosítottunk, és hivatkoztunk az előző IPCC és NCA (nemzeti klímaértékelési) értékelő jelentésekre. Ahol lehetséges volt, 2024-ig terjedő adatokat is felhasználtunk.

Az szerzői team hálás Wright miniszternek a jelentés elkészítésének lehetőségéért, valamint a független tudományos értékelés és a nyílt tudományos vita támogatásáért. Hálásak vagyunk az Energiaügyi Minisztérium (DOE) és a nemzeti laboratóriumi bírálók anonim csapatának is, mert hozzájárultak ahhoz, hogy a végleges jelentés még jobb legyen.

John Christy, Ph.D.

Judith Curry, Ph.D.

Steven Koonin, Ph.D.

Ross McKittrick, Ph.D.

Roy Spencer, Ph.D.

I. RÉSZ: KÖZVETLEN EMBERI HATÁS AZ ÖKOSZISZTÉMÁKRA ÉS A KLÍMÁRA

1 A SZÉN-DIOXID, MINT SZENNYEZŐ ANYAG

Fejezet-összefoglaló

A szén-dioxid (CO₂) sok tekintetben különbözik az úgynevezett szabványos légszennyező anyagoktól (a CAP-októl). Nem befolyásolja a helyi levegőminőséget, és környezeti szinten nincsenek humántoxikológiai következményei. A globális éghajlatra gyakorolt hatása miatt veszik számba lehetséges tényezőként.

Az 1970-es Tiszta Levegő Törvény hat úgynevezett EPA-szabályozás alá eső kritérium szerinti légszennyező anyagot határozott meg: szálló por, talajközeli ózon, kén-dioxid, nitrogén-dioxid, ólom és szén-monoxid. 2007-ben a Legfelsőbb Bíróság kimondta, hogy az üvegházhatású gázok (köztük a CO₂) ugyancsak „szennyező anyagok”, és rájuk is vonatkozik a Tiszta Levegő Törvénye (Mass. kontra EPA, 2007). Bár a „szennyezőanyag” definíciója végső soron jogi kérdés, fontos tudományos különbségek vannak a CO₂ és a kritérium szerinti (szabványos) légszennyező anyagok között. Ez utóbbiak szabályozási ellenőrzés alatt állnak, mivel a koncentrációjuktól függően helyi problémákat okoznak: az embereknek kellemetlenséget (szagot, láthatóság-csökkenést), növényi károsodást, és kellően magas expozíciós szintek esetén toxikológiai hatásokat okoznak. Ezzel szemben a CO₂ szagtalan, nem befolyásolja a láthatóságot, és környezeti szinten nincs toxikológiai hatása. A légkör természetes része, és kulcsfontosságú eleme az emberi és növényi légzésnek. A CO₂ elengedhetetlen a növényi fotoszintézishez, magasabb szintje pedig előnyös a növényzet számára. E tekintetben a CO₂ hasonló a vízgőzhöz.

A kültéri környezet levegője ma körülbelül 430 ppm CO₂-t tartalmaz, ami évente körülbelül 2 ppm-mel emelkedik. Az Egyesült Államok Munkahelyi Biztonsági és Egészségügyi Hivatala irányelveket ad ki a beltéri munkahelyekre, ahol megemelkedett CO₂-szinttel találkozhatunk, például ahol szárazjeget használnak. A megengedett expozíciós határérték 5000 ppm 8 órán át (OSHA, 2024). Allen et al. (2015) arról számolt be, hogy az irodai fülkékben dolgozók teljesítménye, amikor 1000-1500 ppm feletti CO₂-szintnek voltak kitéve, bizonyos kognitív feladatokban csökkent. E szint jóval magasabb, mint bármely, a 22. század végéig valószínűsíthető kültéri környezeti érték.

A légkörben lévő CO₂ növekvő mennyisége közvetlenül befolyásolja a földi rendszert azáltal, hogy elősegíti a növények növekedését (a globális zöldülés), ezáltal növeli a mezőgazdasági terméshozamot, és semlegesíti az óceán lúgosságát. A CO₂-vel kapcsolatos elsődleges aggodalom azonban az üvegházgázként (ÜHG) betöltött szerepe, amely megváltoztatja a Föld energiaegyensúlyát, felmelegíti a bolygót. Az, hogy az éghajlat hogyan reagál erre a hatásra, egy összetett kérdés, ez tölti ki a jelentés nagy részét.

Hivatkozások

- Allen, J., Macnaughton, P., Satish, U., et al. (2015). A kognitív funkciók pontszámainak összefüggései a szén-dioxid-, a szellőztetés- és az illékony szerves vegyületek expozíciójával irodai dolgozóknál: Kontrollált expozíciós vizsgálat zöld és hagyományos irodai környezetekben. Környezeti egészségügyi perspektívák. 124. <https://doi.org/10.1289/ehp.1510037>
- Massachusetts kontra Környezetvédelmi Ügynökség, 549 U.S. 497 (2007). <https://www.oyez.org/cases/2006/05-1120>
- USA Környezetvédelmi Ügynökség. (é.n.). Kritériumok a légszennyezőkre. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>
- USA Munkahelyi Biztonsági és Egészségügyi Hivatala. (2024). OSHA foglalkozási vegyi adatbázis: Szén-dioxid. <https://www.osha.gov/chemicaldata/183>

2 A CO₂ KÖZVETLEN HATÁSA A KÖRNYEZETRE

Fejezet-összefoglaló

A CO₂ fokozza a fotoszintézist és javítja a növények vízfelhasználási hatékonyságát, ezáltal elősegíti a növények növekedését. A globális zöldülés, amely részben a légkörben megnövekedett CO₂-szintnek köszönhető, mindegyik kontinensen jól kimutatható.

Ha a CO₂ a tengervízben elnyelődik, az óceánok lúgossága csökken. A pH-érték jelenkori csökkenése nem lépi túl az évezredes időléptékben megfigyelhető természetes változékonysági tartományt. Az óceáni élővilág nagy része akkor fejlődött ki, amikor az óceánok enyhén savasak voltak. A pH-csökkenés hátrányosan befolyásolhatja a korallokat, ugyanakkor az ausztrál Nagy-korallzátony az elmúlt években jelentős növekedést mutat.

2.1 A CO₂, mint a globális zöldüléshez hozzájáruló tényező

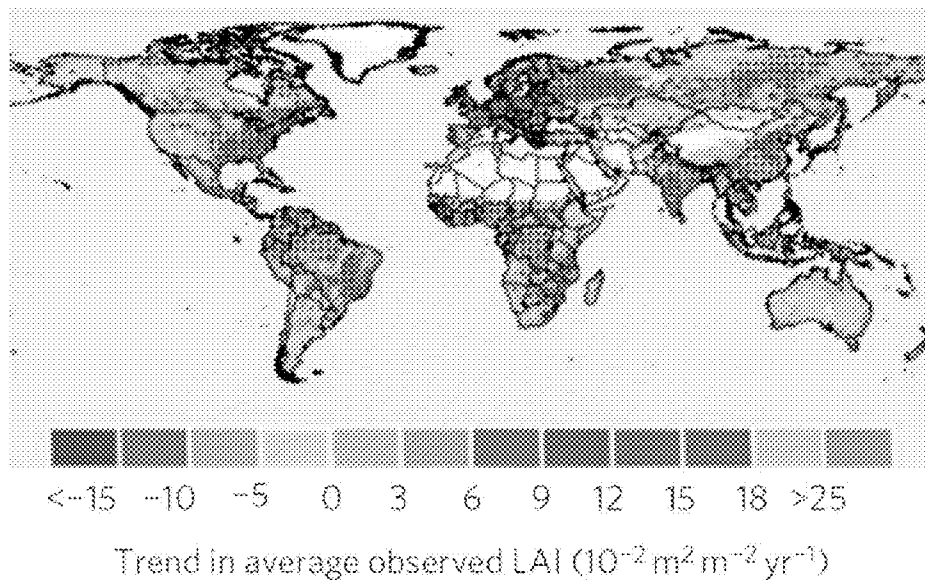
A légkörben az emelkedő CO₂-koncentráció fontos pozitív hatással bír, mivel elősegíti a növények növekedését a fotoszintézis fokozásával és a vízfelhasználás hatékonyságának javításával. Ami megnyilvánul az alábbiakban tárgyalt „globális zöldülés” jelenségében, valamint a 10. fejezetben tárgyalt javuló mezőgazdasági hozamokban is. Itt csak a CO₂-trágyázásra összpontosítunk; a hőmérséklet- és csapadékváltozások együttes hatásainak kutatását a 10. fejezet tárgyalja.

2.1.1 A globális zöldülés mérése

A „zöldülés” a földfelszín növényzettel borított részarányának növekedését jelenti. A műholdakkal mért „levélfelület-index” (LAI) segítségével számszerűsíthető is. Az elmúlt évtized során számos tanulmány erősítette meg a globális zöldülési mintázatot (LAI növekedés), amely részben az emelkedő CO₂-szintnek tulajdonítható. Zhu et al. (2016) az elsők között voltak, akik arról számoltak be, hogy a globális zöldülés műholdas érzékelők segítségével kimutatható. 1982 és 2011 között a Föld területének 25-50 százalékán észleltek zöldülést, szemben a mindössze négyenél alig több százaléknyi „barnulással”, és a zöldülés 70 százalékát az emelkedő CO₂-szintnek tulajdonították (lásd a 2.1. ábrát). További hozzájárulási tényezőt jelent a földhasználat változása, a felmelegedés és a nitrogén. A CO₂-nek tulajdonítható részarány a trópusokon volt a legnagyobb; a CONUS-ban (az USA területileg összefüggő államaiban) egyéb tényezők játszottak dominánsabb szerepet.

Zeng et al. (2017) megerősítette a zöldülés mintázatát, megjegyezve, hogy a globális levélfelületet harminc év alatt 8 százalékkal növekedett, és hogy a zöldülés mérsékelte a felmelegedést. A zöldülést világszerte megfigyelték. Chen et al. (2019) kimutatták, hogy Kínában és Indiában ennek a nagy részét földgazdálkodási változások okozzák. Így, míg Kína a globális növényzeti területnek csak 6,6 százalékát teszi ki, a LAI globális nettó növekedésében 25 százalékot tesz ki. Piao et al. (2020) megjegyezték, hogy a zöldülés még az Arktiszon is megfigyelhető. A CO₂-trágyázás hatásait befolyásolja a helyi hőmérséklet, valamint a tápanyagok és a víz rendelkezésre állása, amelyek mindegyike regionálisan változik.

Míg a növénymodellek az emelkedő CO₂-szintre válaszként a fotoszintézis növekedését jósolják, Haverd et al. (2020) a modellelőrejelzéseknél sokkal nagyobb CO₂-trágyázási arányról számoltak be. Vagyis a CO₂-trágyázás 1900 óta 30 százalékkal növelte a megfigyelt globális fotoszintézist, szemben a növénymodellek által előrejelzett 17 százalékkal. Ha ez igaz, az arra utalna, hogy az emelkedő CO₂ társadalmi-gazdasági hatásainak globális modelljei alábecsülték a növényekre és a mezőgazdaságra gyakorolt előnyöket. Keenan et al. (2023) azonban alacsonyabb trágyázási arányt becsülték, ami jobban összhangban van a modellekkel. A CO₂-trágyázás és a mezőgazdaság közötti kapcsolatot a 9. fejezetben tárgyaljuk.



2.1. ábra: Az átlagos Levélfelületi Index (LAI). Forrás: Zhu et al. 2016, 3. ábra. A LAI dimenzió nélküli mennyiség, amely a növényi lombkorona levélfelületének nagyságát írja le a talajfelülethez viszonyítva.

Piao et al. (2020), valamint Chen et al. (2024) arról számolnak be, hogy a zöldülési trend folytatódik, nincsenek lassulási jelek, és továbbra is a CO_2 -trágyázás a domináns hajtóerő.

2.1.2 Fotoszintézis és CO_2 -szint

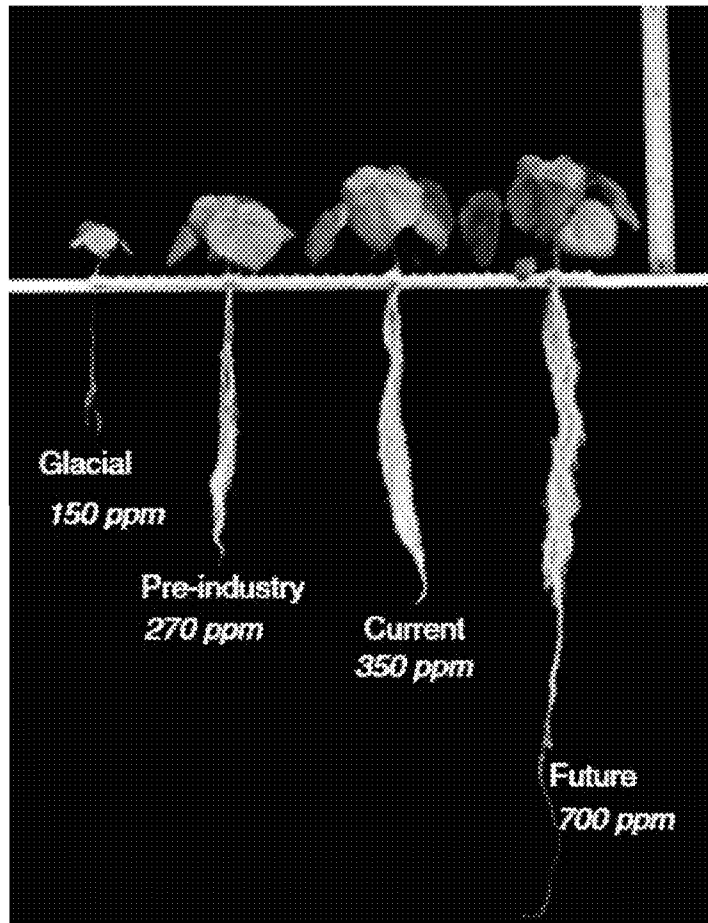
A növények fotoszintézissel építik fel a biomasszájukat, amely folyamat a szén-dioxidot, a vizet és a fényt cukorrá alakítja. A fotoszintézisért felelős növényi enzim a ribulóz-1,5-biszfoszfát-karboxiláz/oxigenáz vagy „Rubisco”. A fotoszintézis akkor indul be, amikor CO_2 a Rubisco enzim felületén rendelkezésre áll, ahol 3 szénatomos molekulává alakul, majd beépül a növény tömegébe. Ezt „C3” folyamatnak nevezik.

A Rubisco enzim becslések szerint körülbelül 3 milliárd évvel ezelőtt fejlődött ki. A geológiai idők során a Föld légkörének CO_2 -szintje általában sokszorosa volt a mai értéknek. Körülbelül 400 millió évvel ezelőtt a CO_2 -szint becslései szerint 2000-4000 ppm volt, a 200 és 50 millió évvel ezelőtti időszak nagy részében pedig 1000 ppm vagy annál magasabb (Berner 2006, Judd et al. 2024). A legutóbbi 35 millió évben a légköri CO_2 -szint folyamatosan csökkent, a eljegesedések idején akár 170 ppm-re is visszaesett (Gerhart és Ward 2010). Bár a CO_2 jelenkori változásának üteme a korábbi időszakokéhoz képest magas lehet, geológiai bizonyítékok szerint a növények és az állatok a jelenleginél sokkal magasabb CO_2 -szint mellett fejlődtek ki.

Az alacsony CO_2 -szintre válaszul egyes növények a fotoszintézisre egy másik módot, az ún. C4-et fejlesztettek ki, amelyben a CO_2 a Rubisco közelében koncentrálódik, lehetővé téve a C3 folyamat hatékonyabb működését. Mezőgazdasági célokra a növénykategóriák a következők:

- C3: rizs, búza, szójabab és a legtöbb más növény
- C4: kukorica, cukornád, köles, cirok

A légköri CO_2 -szint további csökkenése esetén a növényi növekedés lelassult volna, majd végül leállt volna. 180 ppm alatt számos C3 faj növekedési üteme a 350 ppm-hez képest (40-60 százalékkal csökken (Gerhart és Ward 2010), és a növekedés 60-140 ppm CO_2 -koncentrációjú kísérleti körülmények között teljesen leállt. Egyes C4 növények még 10 ppm-es CO_2 -szinten is képesek növekedni, bár nagyon lassan (Gerhart és Ward 2010).



2.2 ábra: A sárga selyemmályva (*Abutilon theophrasti*) 14 nap alatti növekedése, miközben az összes többi kísérleti körülmény a CO₂-szint kivételével megegyezett. Forrás: Gerhart and Ward (2010). A képen a "Current" (jelenlegi) szint 1988-nak felel meg.

A jelenlegi CO₂-szint körülbelül 430 ppm, szemben az 1800-as évek eleji 280 ppm-mel. A növények pozitív reakcióját a CO₂-többletre a 2.2. ábra szemlélteti, Gerhart és Ward (2010) munkájából reprodukálva. Az ábra a CO₂ növekedési hatását mutatja a sárga selyemmályva (*Abutilon theophrasti*) palántákra 14 nap alatt, kontrollált körülmények között, ahol csak a CO₂-kitettség változik. A CO₂ 150 ppm-ről 350 ppm-re történő emelésével elért nyereség a 700 ppm-re való további megduplázódás esetén is folytatódik. A legutóbbi több mint 60 évben a növekvő CO₂-szintre adott növényi válaszáról több ezer tanulmány készült. A legfontosabb kutatási téma az, hogy a növények, különösen a C3 növények, profitálnak a többlet CO₂-szintből. A CO₂ két mechanizmus révén biztosít növekedési előnyt:

- A fotoszintézis fokozódása a fent leírt anyagcsere-módokon keresztül.
- A vízfelhasználási hatékonyság megnövekedett. Ez azért történik, mert a növények a levél felszínén lévő gázcserenyílások (pórusok) kinyitásával vonják be a CO₂-t. Amikor a CO₂ szűkösen áll rendelkezésre, a gázcserenyílásokat hosszú ideig kell tágra nyitva tartani, hogy a víz elpárologhasson. CO₂-ben dús körülmények között a gázcserenyílások hosszabb ideig maradnak zárva, így segítve a növényt a víz hosszabb ideig történő megtartásában, ezáltal növelve a vízfelhasználási hatékonyságot. A klímaváltozás amerikai mezőgazdaságra gyakorolt konkrét hatásait a 9. fejezetben tekintjük át.

2.1.3 Növekvő CO₂- és növényi vízfelhasználási hatékonyság

Derying et al. (2016) áttekintették a növények vízhozamát (CWP), azaz a hozam/felhasznált víz arányra vonatkozó bizonyítékokat, ráirányítva a figyelmet arra, hogy a CO₂ képes a fotoszintézis fokozására és a levélszintű párologtatás csökkentésére (a levéllégzés során a vízvesztés csökkentésére). Felmérték az összes rendelkezésre álló FACE-adatot (szabadlevegős CO₂-dúsulást – ld. 9. fejezet) a kukorica, a búza, a rizs és a szója terméshozam-változásairól, és kombinálták azokat a 2080-as állapotra vonatkozó terméshozam-válaszokat szimuláló növénymodell-adatokkal a szélsőséges RCP8.5 kibocsátási forgatókönyv szerint négy termesztő régióban (trópusi, száraz, mérsékelt és hideg), amelyek mindegyikét esővel öntözött és mesterségesen öntözött alrégiókra osztották. Jelentésük szerint a CO₂-trágyázás nélküli modellek minden régióban CWP-vesztéset jósoltak, de ezeket a CO₂-trágyázás bőven ellensúlyozta, így minden régió nettó CWP-növekedést mutatott. Derying et al. (2016) arról is beszámolt, hogy a felmelegedés búza- és szójababhozamokra gyakorolt negatív hatásait teljes mértékben ellensúlyozta a CWP-növekedés. A rizs esetében a mitigáció akár 90%-osnak, a kukorica esetében pedig 60%-osnak bizonyult.

Hasonlóképpen, Cheng et al. (2017) megjegyezte, hogy az 1982 és 2011 között a növekvő CO₂-megkötés miatt megnövekedett bruttó elsődleges termelés (GDP) olyan nagymértékű nyereséggel járt együtt a növényzet vízfogyasztásában (CWP), hogy a növények globális vízfelhasználása a többlet biomassza ellenére sem nőtt.

Derying et al. (2016) azt feltételezte, hogy a klímaváltozás „súlyosbítja a vízhiányt”. Míg a modellek azt jósolják, hogy a felmelegedés hatására a száraz területek nagysága nő, a jelenlegi adatok az ellenkezőjét mutatják: még a száraz területek is zöldülnek. Zhang et al. (2024) arról számolnak be, hogy a megnövekedett CO₂-szint miatt „a száraz területek fokozódó szárazsága nem vezet a növényzet termőképességének általános csökkenéséhez”; a jelenleg száraz területeknek legfeljebb csak 4 százalékan fog fokozódni az elsivatagosodás.

2.1.4 A CO₂-trágyázás előnyei az IPCC-jelentésekben

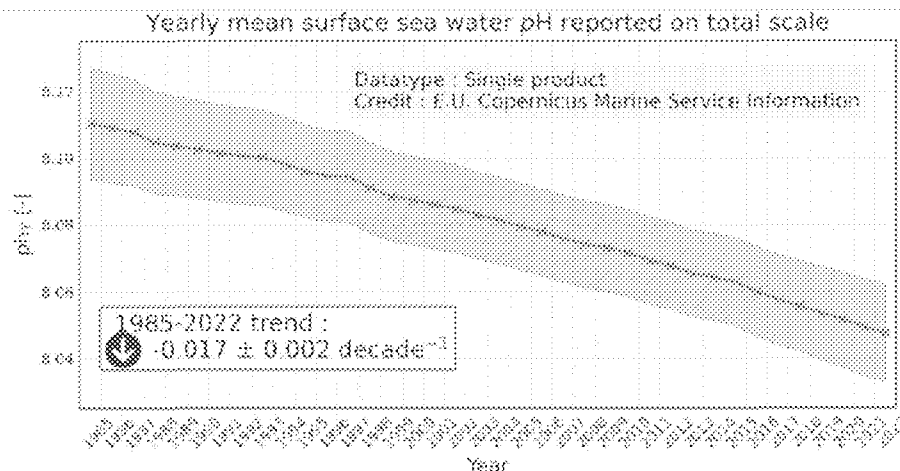
Az IPCC alig foglalkozik a globális zöldüléssel és a mezőgazdasági növények CO₂-trágyázásával. A téma röviden említésre kerül az IPCC 6. és korábbi értékelő jelentéseinek törzsében, de az összes összefoglaló dokumentumból kimarad. Az AR6 I. munkacsoport jelentésének 2.3.4.3.3. szakasza, melynek címe „Globális zöldülés és barnulás”, rámutat, hogy az IPCC klímaváltozásról és földhasználatról szóló különjelentése nagy bizonyossággal arra a következtetésre jutott, hogy a zöldülés az elmúlt 2-3 évtized során globálisan fokozódott. Ezután arra tér rá, hogy a zöldülési trendben eltérések vannak az adathalmazok között, és arra a következtetésre jut, hogy bár nagy bizonyossággal állítják, hogy zöldülés történt, a trend nagyságrendjét alacsony megbízhatóságúnak nevezik. Az AR6 I. és II. munkacsoport jelentéseinek néhány további fejezetében röviden megemlíti a CO₂-trágyázás hatásait és a vízfelhasználás hatékonyságának javulását.

Összességében elmondható azonban, hogy az AR5 és AR6 politikai döntéshozóknak szóló összefoglalói, a technikai összefoglalók és a szintézisjelentések nem tárgyalják a témát.

2.2 A lúgos óceánok

2.2.1 A pH változása

A semleges vizes oldat pH-ja 7,0, míg a 7,0-nél nagyobb pH-jú oldat lúgos (más néven bázikus), a 7,0-nél kisebb pH-jú pedig savas. A felszíni tengervíz jelenkori globális átlagos pH-értékét 8,04-re becsülik (Copernicus Marine Service 2025, 2.3. ábra), szemben az iparosodás előtti időkben becsült 8,2-es értékkel (Gattuso és Hansson, 2011). Ahogy a légkör CO₂-koncentrációja emelkedett, az óceánok többet nyeltek el, ami csökkentette a pH-értéküket. Az óceánok pufferkapacitásától függően várható, hogy idővel némileg kevésbé lesznek lúgosak, ami összhangban van a pH megfigyelt csökkenésével.

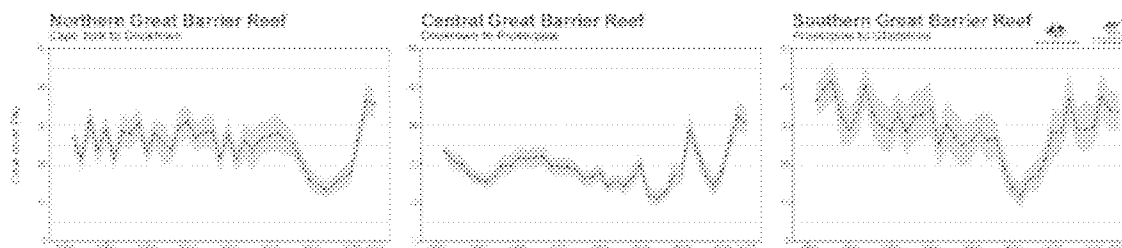


2.3 ábra: Óceáni pH 1985 – 2022. Forrás: Copernicus Marine Service 2025

E folyamatot gyakran „óceáni savasodásnak” nevezik, de ez félrevezető elnevezés, mivel az óceánok várhatóan nem válnak savassá; pontosabb lenne az „óceán semlegesítődése”. Ha a víz savassá válna, akkor is az a vélekedés, hogy az óceánokban az élet akkor fejlődött ki, amikor az óceánok enyhén savasak voltak, 6,5 és 7,0 közötti pH-értékkal (Krissansen-Totton et al., 2018). Több ezer éves időléptékben a bórízotóp-proxy mérések azt mutatják, hogy az óceán pH-értéke a legutolsó eljegesedés idején (körülbelül 20 000 évvel ezelőtt) 7,4 vagy 7,5 körül volt, és a mai értékekre emelkedett, ahogy a világ az eljegesedés csökkenése során felmelegedett (Rae et al., 2018). Így az óceáni élőlények ellenállónak tűnnek az óceán pH-értékének természetes hosszú távú változásaival szemben, mivel a tengeri élőlények széles pH-tartománynak voltak kitéve.

2.2.2 Korallzátony-változások

Vannak aggodalmak arra vonatkozóan, hogy a tengervíz pH-értékének csökkenése csökkenti a korallzátonyok kalkifikációs (meszesedési) sebességét. A korallzátonyok azonban már most is nagy pH-ingadozásokat mutatnak, részben a zátonyban zajló napi fotoszintézis-aktivitás miatt; a mért pH-értékek a nappali 9,4-től éjszaka 7,5-ig terjedően változnak (Revelle és Fairbridge, 1957). De’ath et al. (2009) arról számol be, hogy Ausztrália Nagy-korallzátonyának (GBR, a világ legnagyobb korallzátony-ökoszisztémája) egy részén 1990 óta 14 százalékos csökkenést tapasztaltak a meszesedésben. Ezt a víz hőmérsékletének emelkedésével és a pH csökkenésével igyekeztek magyarázni. Ridd et al. (2013) azonban kimutatta, hogy ez a jelentés egy elfogult adatelemzés eredménye, amely korrigálva nem mutatott változást a meszesedési arányban. Mindazonáltal az eredeti cikk által kiváltott riadalom továbbra is fennáll, amint azt az eredeti tanulmányra publikált hivatkozások nagy száma (541) is bizonyítja, szemben a javításra vonatkozó dolgozat mindössze 11 hivatkozásával (2025. április 30-i állapot szerint). Az Ausztrál Tengertudományi Intézet legfrissebb éves GBR-körülmeny-összefoglalója szerint a korallzátony-termelékenység erőteljesen fellendült (AIMS, 2023). A 2.4. ábra az AIMS keménykorall-borításra vonatkozó felméréseinek eredményeit mutatja, a zátonyterület százalékában kifejezve. A GBR 2011 előtti csökkenésének nagy része az intenzív trópusi ciklonvékenységnek (Beeden et al., 2015), valamint egy sor tengeri hőhullámnak, mezőgazdasági lefolyásnak és invazív fajoknak tudható be (Woods Hole, 2023). Tekintettel a GBR-meszesedés 1990 és 2009 közötti csökkenésére és a légköri CO₂-szint folyamatos növekedésére, a fellendülés egyes megfigyelőket meglepett.



2.4 ábra: A keménykorall-borítás a Nagy korallzátony három régiójában 1985-től 2023-ig. Forrás: AIMS 2023.

Egyre inkább felismerik, hogy a publikációs torzítás (az óceáni savasodás riasztó eredményei, amelyeket a nagy hatású kutatási publikációk előnyben részesítenek) eltúlozza az óceáni pH-érték csökkenésének hatásait. Az ICES Journal of Marine Science különszáma ezt a problémát egy „Tágabb perspektíva felé az óceánsavasodási kutatásokról” című cikkben tárgyalta. A különszám bevezetőjében H. I. Browman kijelentette: „Ahogy az a tudomány egészére igaz, az olyan cikkeket, amelyek arról számolnak be, hogy az óceáni savasodásnak nincsenek hatásai, jellemzően nehezebb publikálni.” (Browman, 2016).

Hasonlóképpen, az óceáni savasodás zátonyhalak viselkedésére gyakorolt negatív hatásának metaanalízise (Clements et al., 2021) az úgynevezett „csökkenési hatást” találta: a neves folyóiratokban megjelent, kezdetben drámai következtetéseket, amelyek a savasodás látszólag nagy hatásait mutatták, általában nagyobb mintákon végzett későbbi tanulmányok követték, amelyek arról számoltak be, hogy a hatások sokkal kisebb és jellemzően nem is léteznek. Felszólítják kollégáikat, hogy fejlesszék kutatási gyakorlataikat a „hanyatlási hatás” ellensúlyozása érdekében:

E területen a jelentős hatást mutató tanulmányok túlnyomó többségét általában alacsony mintaelemszám jellemzi, mégis nagy impaktfaktorú folyóiratokban jelennek meg, és az idézettség tekintetében aránytalanul nagy szakterületi befolyásra tettek szert. Azt állítjuk, hogy az óceánok savasodásának a halak viselkedésére elhanyagolható közvetlen hatása van, és a jövőbeli kutatási területeken a hanyatlási hatás lehetőségének minimalizálása érdekében jobb megközelítéseket szorgalmazunk (Clements et al., 2021).

Összefoglalva, az óceáni élővilág összetett, és nagy része akkor fejlődött ki, amikor az óceánok a jelenlegihez képest savasabbak voltak. A modern korallok ősei először körülbelül 245 millió évvel ezelőtt jelentek meg. A CO₂-szint több mint 200 millió évvel később sokszor magasabb volt, mint ma. Az óceánok „savasodásának” a tengeri élővilágra gyakorolt hatásairól szóló nyilvános viták nagy része egyoldalú és eltúlzott volt.

Hivatkozások

AR6: Éghajlatváltozási Kormányközi Testület Hatodik Értékelő Jelentése (2021) I. Munkacsoport Hozzájárulása. www.ipcc.ch.

Ausztrál Tengertudományi Intézet. (2022). A korallzátonyok folyamatos regenerálódása 36 éves csúcsokat eredményezett a Nagy-korallzátony kétharmadán. https://www.aims.gov.au/sites/default/files/2022-08/AIMS_LTMP_Report_on%20GBR_coral_status_2021_2022_040822F3.pdf

Beeden, R., Maynard, J., Puotinen, M., Marshall, P., Dryden, J., Goldberg, J., és Williams, G. (2015). A Yasi súlyos trópusi ciklon hatásai és a felépülés a Nagy-korallzátonyon. PLOS ONE, 10, e0121272. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121272>

Berner, R. A. (2006). GEOCARBSULF: Kombinált modell a fanerozoikum légköri O₂ és CO₂ vizsgálatára. Geochimica et Cosmochimica Acta, 70, 5653–5664. 9

- Browman, H. I. (2016). Szervezett szkepticizmus alkalmazása az óceánok savasodási kutatásában. *ICES Journal of Marine Science*, 73(3), 529.1–536. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw010>
- Chen, C., Park, T., Wang, X., Piao, S., Xu, B., Chaturvedi, R. K., és Myneni, R. B. (2019). Kína és India vezető szerepet tölt be a világ zölddé tételében a földhasználat-gazdálkodás révén. *Nature Sustainability*, 2, 122–129. <https://www.nature.com/articles/s41893-019-0220-7>
- Chen, X., Wang, Y., Liu, Y. és Piao, S. (2024). A globális zöldülés a 2000 óta fokozódó aszály okozta stressz ellenére is folytatódik. *Global Ecology and Conservation*, 49, e02791. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351989423004262>
- Cheng, L., Zhang, L., Wang, Y. P. et al. (2017). A szárazföldi szénmegkötés közelmúltbeli növekedése a víz körforgására gyakorolt kis költséggel. *Nature Communications*, 8, 110. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00114-5>
- Clements, J. C., Sundin, J., Clark, T. D. és Jutfelt, F. (2022). Metaanalízis extrém „csökkenési hatást” tár fel az óceáni savasodás halak viselkedésére gyakorolt hatásában. *PLOS Biology*, 20(2), e3001511. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001511>
- Copernicus Marine Service. (2025). Globális óceáni savasodás – Az átlagos tengervíz pH-értékének idősorai és trendje több megfigyelés újrafeldolgozásból. https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_OMI_HEALTH_carbon_ph_area_averaged/description
- De'ath, G., Lough, J. és Fabricius, K. (2009). Csökkenő korall-meszesedés a Nagy-korallzátonyon. *Science*, 323, 116–119. <https://doi.org/10.1126/science.1165283>
- Daryng, D., Conway, D., Ramankutty, N., Price, J., Warren, R., Jones, R., ... és Elliott, J. (2016). Regionális különbségek a növekvő CO₂-koncentráció jótékony hatásaiban a növényi vízhozamra. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/nclimate2995>
- Gattuso, J. P. és Hansson, L. (szerk.). (2011). Óceánok savasodása: Háttér és történelem. Oxford University Press.
- Gerhart, L. M., és Ward, J. K. (2010). Növények reakciói a múltbeli alacsony [CO₂]-szintre. *New Phytologist*, 188, 674–695. <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1469-8137.2010.03441.x>
- Haverd, V., B. Smith, J. G. Canadell, et al. (2020). Higher than expected CO₂ fertilization inferred from leaf to global observations. *Global Change Biology*, 26, 2390–2402. <https://doi.org/10.1111/gcb.14950>
- Keenan, T. F., X. Luo, B. D. Stocker, et al. (2023). A constraint on historic growth in global photosynthesis due to rising CO₂. *Nature Climate Change* 13(12): 1376-1381 DOI: 10.1038/s41558-023-01867-2.
- Judd, E. J., Scotese, C. R., Young, S. A., et al. (2024). A 485-million-year history of Earth's surface temperature. *Science*, 385(6715). <https://doi.org/10.1126/science.adk3705>
- Krissansen-Totton, J., Arney, G. N., and Catling, D. C. (2018). Constraining the climate and ocean pH of the early Earth with a geological carbon cycle model. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(6), 4105–4110. <https://doi.org/10.1073/pnas.1721296115>
- Piao, S., X. Wang, T. Park, et al. (2020). Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment* 1(1): 14-27 DOI: 10.1038/s43017-019-0001-x
- Rae, J. W. B., Burke, A., Robinson, L. F., et al. (2018). CO₂ storage and release in the deep Southern Ocean on millennial to centennial timescales. *Nature*, 562, 569–573. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0614-0>
- Revelle, R., and Fairbridge, R. W. (1957). Carbonate and carbon dioxide. In J. W. Hedgpeth (Ed.), *Treatise on marine ecology and paleoecology* (Vol. 1). Geological Society of America.

- Ridd, P., Silva, E., and Stieglitz, T. (2013). Have coral calcification rates slowed in the last twenty years? *Marine Geology*, 346, 392–399. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.09.002>
- Woods Hole Oceanographic Institution. (2023). Is the Great Barrier Reef making a comeback? <https://www.whoi.edu/oceanus/feature/is-the-great-barrier-reef-making-a-comeback/>
- Zeng, Z., Piao, S. Li, L., et al. (2017). Climate mitigation from vegetation biophysical feedbacks during the past three decades. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/nclimate3299>

3 EMBERI ÉGHAJLATI HATÁSOK

Fejet-összefoglaló

A globális éghajlat minden időléptékben természet változások függvénye. Az antropogén CO₂-kibocsátás azáltal járul hozzá ehhez a változékonysághoz, hogy megváltoztatja a légkör teljes sugárzási energiaegyensúlyát.

Az IPCC lekicsinyli a Nap szerepét az éghajlatváltozásban, de léteznek olyan kézenfekvő napsugárzási rekonstrukciók, amelyek szerint a Nap hozzájárulhatott a jelenkori felmelegedéshez.

Az éghajlati előrejelzés („projekció”) az IPCC kibocsátási forgatókönyvein alapul, de ezek trendjei rendre meghaladják a megfigyeléseket. Az elmúlt évek legtöbb éghajlattudományi hatástanulmánya a szélsőséges RCP 8.5 forgatókönyvön alapul. Ezt ma már valószínűtlennek tartják; szokásos üzletmeneti forgatókönyvként való alkalmazása: félrevezető.

A szén ciklus-modellek az éves kibocsátást összekapcsolják a légköri CO₂-készlet növekedésével. A modellek ugyan ellentmondásosak a szárazföldi és óceáni CO₂-megkötés mértékével kapcsolatban, de abban mind egyetértenek, hogy a CO₂-megkötés 1959 óta növekedésben van.

Bizonyítékok léteznek arra, hogy a szárazföldi felmelegedési adatokban megmutatkozó városi torzítást az éghajlati adatsorokból nem távolították el teljes mértékben.

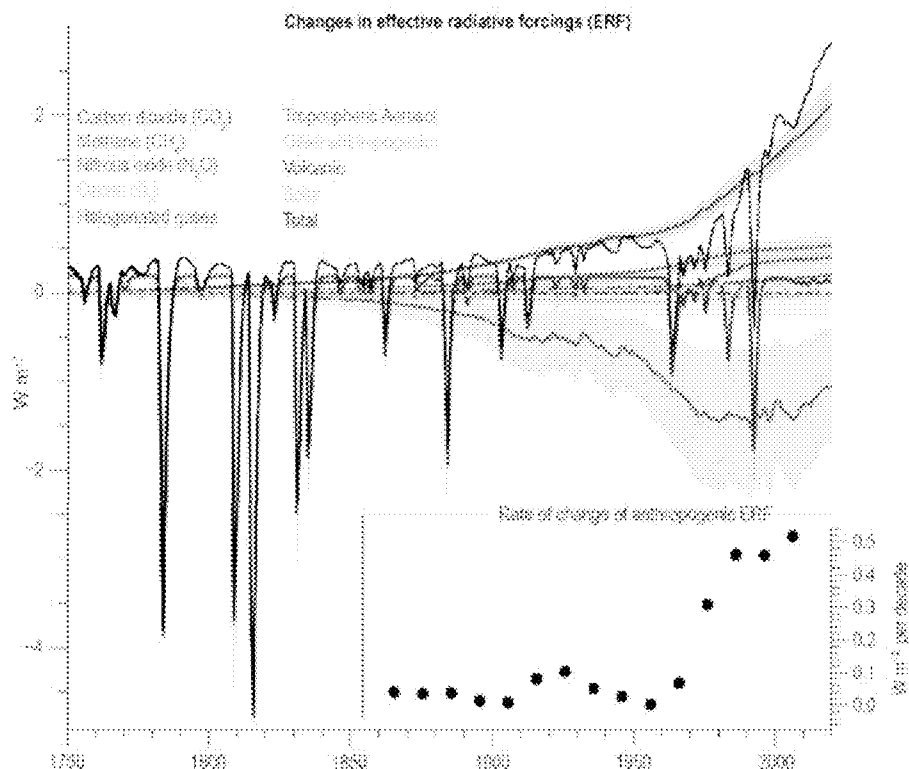
3.1 A sugárzási kényszer összetevői és történeteük

3.1.1 Történelmileg ismert sugárzási kényszer

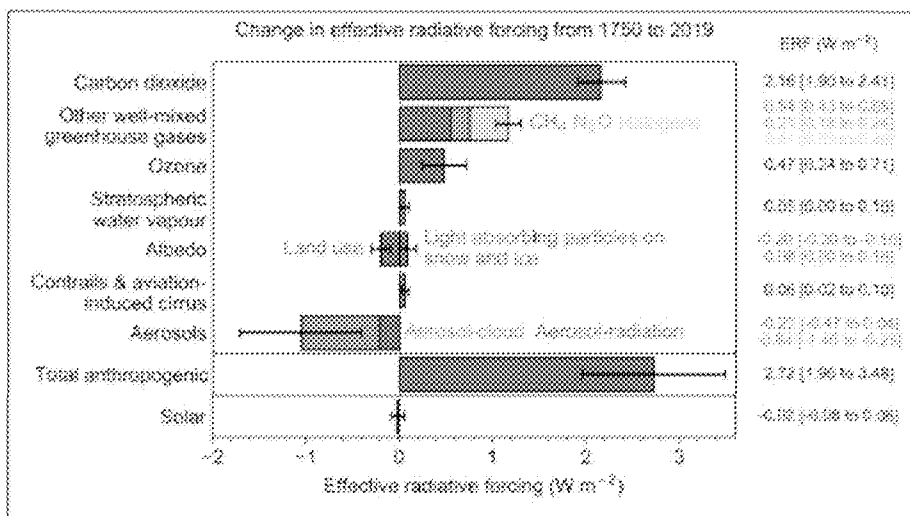
A Föld 4,6 milliárd éves történetében az éghajlatváltozás mindig is jellemző volt. A Föld hőmérséklete és időjárási mintázatai természetes módon változnak évtizedektől több millió évig terjedő időléptékben. A felszíni éghajlat természetes változásai kétféleképpen keletkeznek. A légkörben és az óceánban zajló cirkulációval összefüggő belső éghajlati ingadozások révén a légkör, az óceánok, a szárazföld és a jég között energia, víz- és szén csere zajlik. Az éghajlati rendszerre gyakorolt külső hatások közé tartoznak a Naptól származó energia változásai és a vulkánkitörések hatásai. Az emberi tevékenységek a földhasználat és a föld befedése megváltoztatásával befolyásolják az éghajlatot. Az emberek a légkör összetételét is megváltoztatják a CO₂ és más üvegházhatású gázok kibocsátásával, valamint a légkörben lévő aeroszolrészecskék koncentrációjának változtatásával.

A Földet az elnyelt napfény melegíti, és az űrbe kisugárzott hő hűti. A Föld felszínén átlagolva ezek a folyamatok körülbelül 240 watt/négyzetméter (W/m²) energiaáramlást jelentenek. Amikor egyensúlyban vannak, sem a felmelegedésnek, sem a lehűlésnek nincs nettó külső ok. Mind az emberi, mind a természetes éghajlati hatások megváltoztatják ezt az egyensúlyt, és így az éghajlat megváltozását okozzák.

A Föld légkörének tetején lévő energiaegyensúlyra gyakorolt hatásokat, azaz azt, hogy milyen mértékben keletkezik zavar a felmelegedés/lehűlés egyensúlyában, az ún. „sugárzási kényszer” számszerűsíti; a pozitív kényszer melegít, míg a negatív kényszer hűt. Az IPCC becsült adatai a sugárzási kényszer főbb összetevőinek 1750 óta tartó alakulásáról az AR6 itt bemutatott két ábráján látható.



3.1.1 ábra: A sugárzási kényszer összetevőire vonatkozó becslések időbeli változása. A sátozás a bizonytalansági határt jelzi. Forrás: AR6 WGI 2. fejezet, 10. ábra



3.1.2. ábra: A sugárzási kényszer összetevőinek változása 1750-től 2019-ig az IPCC szerint. Forrás: AR6 WGI 7. fejezet, 7-6. ábra

E grafikonok azt mutatják, hogy a teljes sugárzási kényszer természetes és antropogén összetevőkből tevődik össze. Az éghajlatot az ember leginkább a fosszilis tüzelőanyagok felhasználásával, a szén-dioxiddal befolyásolja. Melegítő hatást fejt ki azáltal, hogy csökkenti a légkör hűtőerejét. A CO₂-kibocsátás felhalmozódik a légkörben, amint azt a következő szakaszban ismertetjük, így a felmelegítő hatás erősödik. Egyéb üvegházhatású gázok (metán, dinitrogén-oxid, halogének és ózon) hasonlóan hatnak, így ezek együttesen a CO₂ által jelentett felmelegedéshez

képest további 75 százalékkal járulnak hozzá. Az aeroszolk összességében hűtő hatást fejtenek ki, bár nagy a bizonytalanság abban, hogyan működnek közre katalizátorként a fényvisszaverő felhők kialakulásában. Ennek eredményeként a jelenkori felmelegedés okainak megértéséhez nemcsak a CO₂ melegítő hatásainak azonosítása szükséges, hanem az aeroszolk bizonytalanabb hűtő hatásainak beazonosítása is.

Az IPCC a Nap sugárzási kényszerének változását elhanyagolhatónak becsüli, mivel az iparosodás előtti idők óta a csekély szoláris változást feltételező adatrekonstrukciókat részesítik előnyben. Connolly et al. azonban (2021) a szakirodalomból az 1600-2000 közötti évekre vonatkozóan tizenhat különféle teljes napbesugárzási (TSI) rekonstrukciót gyűjtött össze; a rekonstrukciók a TSI alig változó állapotától egy viszonylag erősen emelkedő tendenciáig terjednek. A szerzők megjegyzik, hogy a TSI-változás és a felszínhőmérséklet-változás rekonstrukcióinak kombinációja lehetővé tesz olyan következtetéseket, ami azzal a feltételezéssel vannak összhangban, hogy a 20. századi felmelegedés egyáltalán nem tulajdonítható a Napnak, de olyat is, hogy nagyrészt a Napnak tulajdonítható.

Különösen nehéz kérdést vet fel a TSI 1989 és 1991 közötti adathiánya, amely egy megfigyelőeszköz felbocsátásának a Challenger űrrepülőgép 1986. január 28-i katasztrófája miatti késedelem folyománya. E késés megakadályozta, hogy a korábbi felváltó új műholdat idejekorán felbocsássák annak érdekében, hogy az előző rendszerrel időben átfedő adatokat szolgáltatson, és a két adatsort egymással hitelesíteni lehessen (Zacharias 2014, Scafetta et al. 2019). Ez az ún. ACRIM (Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor) hézagprobléma. Az ugyanis, hogy van-e emelkedő tendencia a TSI-ben 1978 és 2018 között, attól függ, miként pótolják az ACRIM adathiányát. Connolly et al. (2021) megállapította, hogy az IPCC konszenzusos nyilatkozatait a napsugárzási kényszerrel az eltérő tudományos vélemények elnyomásával idő előtt fogalmazták meg.

A sugárzási kényszer egy másik természetes összetevőjét az időnkénti hűtőhatást kifejtő vulkáni aeroszolk jelentik. Az IPCC AR6 jelentés 4.1. tudásdoboz a vulkánkitörések éghajlati hatásával foglalkozik, megemlítve három robbanásszerű vulkánkitörést, amelyek a 19. század első felében történtek. Ezek közé tartozott az 1815-ös Tambora-kitörés, ami a „nyár nélküli évet” eredményezte, és az északi féltekén számos termés kieséssel járt. Bizonytalanság van a 2022-ben kitört Hunga Tonga tengeralatti vulkán által jelentett viszonylag kis sugárzási kényszer előjelével kapcsolatban is (Jenkins et al., 2023, Schoeberl et al., 2024).

A 3.1.1. ábra azt mutatja, hogy a sugárzási kényszer antropogén összetevője 1900 előtt elhanyagolható volt, azóta pedig folyamatosan növekszik, mára közel 3 W/m²-re emelkedett. Ez azonban még mindig csak körülbelül 1 százaléka a zavartalan sugárzási áramnak, ami megnehezíti az antropogén kényszer hatásának elkülönítését; a globális sugárzási energiaáramot a legmodernebb műholdakkal is csak néhány W/m² pontosságban lehet megbecsülni.

A vulkánkitöréseken és a teljes napsugárzáson (TSI) kívül a globális energiaegyensúlyban eltérést okozó egyéb természetes források ezeken a grafikonokon nem szerepelnek, mivel azok nagyrészt ismeretlenek.

3.1.2 A légköri CO₂ változása 1958 óta

A szén-dioxid melegítő hatása attól függ, hogy mennyi CO₂ többlet halmozódik fel a légkörben – azaz mennyivel haladja meg a koncentráció az iparosodás előtti 280 ppm-nyi értéket. A hawaii Mauna Loa obszervatóriumban megfigyelt CO₂-szint, amit általában reprezentatív globális átlagos koncentrációként használnak, online elérhető a <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/index.html> címen. A koncentráció a megfigyelés kezdetén, 1959-ben körülbelül 316 ppm volt, és most körülbelül 430 ppm, ami 36 százalékos növekedést jelent. A legutóbbi eljegesedési maximum végére a CO₂-szint körülbelül 180 ppm-re csökkent. Amint azt a 2. fejezetben tárgyaltuk, a C3 növények körülbelül 140 ppm alatti CO₂-szintnél, a C4 növények pedig 100 ppm alatti szinten kezdenek el pusztulni, így a CO₂-szint tovább csökkenése esetén a növényi élet veszélybe került volna.



3.1.3. ábra: A CO₂-koncentráció éves átlagértékének alakulása (1995-2025) ppm-ben, a Mauna Loa-megfigyelés szerint (kék). C3 küszöb: az a szint, ami alatt a C3 növények kezdenek elpusztulni (140 ppm, ld. 2. fejezet). C4 küszöb: Az a szint, ami alatt a C4 növények kezdenek elpusztulni (100 ppm, ld. 2. fejezet). Glaciális CO₂-minimumszint: a jelenlegi jégkorszak legkisebb CO₂-koncentrációja (lila nyíl). CO₂-adatforrás: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/index.html>

3.2 Jövőbeni kibocsátási forgatókönyvek és a szén ciklus

3.2.1 Kibocsátási forgatókönyvek

A jövőbeni ÜHG-kibocsátás veszélyeinek felméréséhez feltételezésekre van szükség arról, hogy mekkora lesz a kibocsátás. A jövőbeni kibocsátás, és így az emberi hatás az éghajlatra egyaránt függ a jövőbeni demográfiai változásoktól, a gazdasági tevékenységtől, a szabályozástól, valamint az energia- és mezőgazdasági technológiáktól. Az ezek mindegyikére vonatkozó egyes feltételezésekből következtetnek az üvegházgáz-kibocsátásra és légköri koncentrációjukra, az aeroszolkoncentráció és a földhasználat változások előrejelzéseire, amiket végső soron kombinálni lehet az antropogén sugárzási kényszerre vonatkozó feltételezésekkel.

A számos tényező mindegyikével kapcsolatos nagy bizonytalanság lehetetlenné teszi a jövőbeni kibocsátás pontos előrejelzését. Ehelyett az IPCC különféle forgatókönyv-készleteket használ. Ezeknek az a célja, hogy felöleljék a népesség, a gazdaság és a technológiák kézenfekvő lehetőségeinek széles skáláját. A forgatókönyvek legújabb verzióit egy szám jelöli, amely az adott forgatókönyv szerint 2100-ban várható antropogén sugárzási kényszert jelzi. Így a „6”-ossal jelölt forgatókönyv 6 W/m² ember által okozott sugárzási kényszernek (felmelegedésnek) felel meg a század végén. (Emlékezzünk vissza, hogy a jelenlegi antropogén sugárzási kényszer körülbelül 2,7 W/m².)

Bár az IPCC nem állítja, hogy kibocsátási forgatókönyvei előrejelzések, gyakran annak kezelik őket. A múltbeli forgatókönyv-csoportok és a megfigyelések összehasonlítása azt mutatja, hogy az IPCC kibocsátási előrejelzései hajlamosak voltak túlbecsülni a tényleges későbbi kibocsátásokat. Az IPCC harmadik és negyedik értékelő jelentéséhez a kibocsátási forgatókönyvekről szóló különjelentésből származó kibocsátási előrejelzések halmazát használták; ezeket SRES-forgatókönyveknek nevezték. McKittrick et al. (2012) kimutatták, hogy az egy főre jutó értékekre

átszámítva a SRES-forгатókönyv kibocsátás-eloszlása a megfigyelt trendekhez képest felfelé torzít. A SRES-forгатókönyvek torzítását megerősítette Hausfather et al. (2019) későbbi elemzése is. Ők azt mutatták ki, hogy a megfigyelt légköri CO₂-koncentráció a SRES-tartomány, valamint a későbbi IPCC-forгатókönyvek tartományainak alsó határát követték (3.2.1. ábra).

Az AR5-höz az IPCC egy új forгатókönyv-készletet dolgozott ki, amelyet reprezentatív koncentrációs útvonalaknak (RCP) neveznek. Ezeket egy olyan számmal azonosították be, amely a kényszererő növekedését jelenti, és így nevezték el őket RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 és RCP8.5 néven. Az RCP2.6 (amely 2100-ban 2,6 W/m² antropogén sugárzási kényszert jelent) egy olyan üvegházhatású gázkoncentrációs útvonalat ír le, ami jóval 2°C alatti felmelegedéshez vezet. A skála másik végén az RCP8.5 egy szélsőséges eredmény, ami 1900 és 2100 között közel 5°C-os felmelegedést jelent.

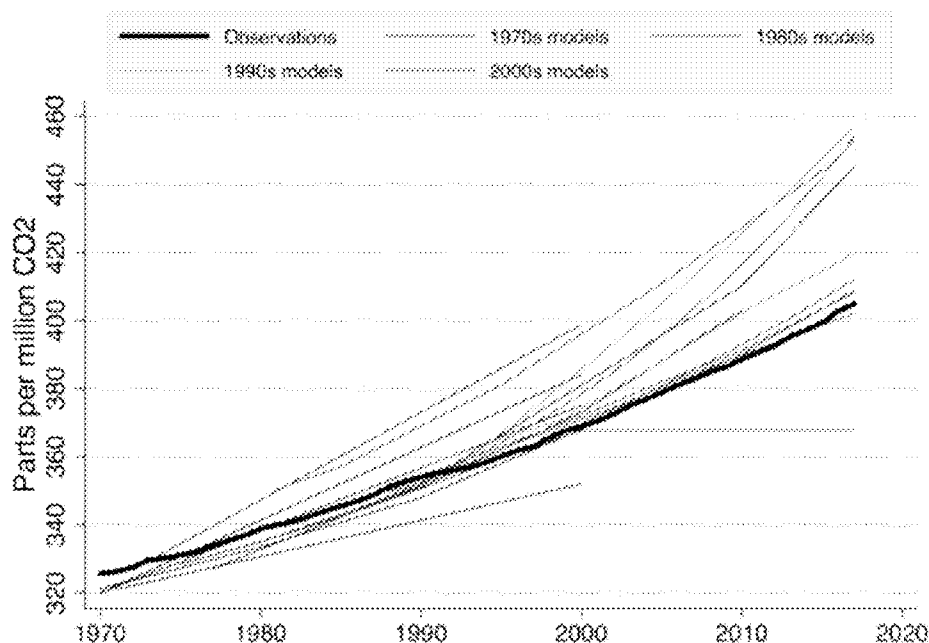
Mind a tudományos irodalomban, mind a népszerű médiában az RCP8.5-öt kezdték a klímapolitika nélküli, vagyis a „szokásos üzletmeneti” forгатókönyvként emleget. Ezért használták fel egy olyan referenciaeredmény generálására, amely az állítás szerint egy egyre szigorúbb kibocsátáscsökkentési politika nélküli 21. századi világot jelenít meg. Az RCP8.5 forгатókönyvet azonban egy alacsony valószínűségű, magas kibocsátású forгатókönyvnek szánták, és a szokásos üzletmenet alapjául szolgáló forгатókönyvként való használatát súlyosan félrevezetőnek minősítették.¹ Hausfather és Peters (2020a) a Nature folyóiratban megjelent kommentárjukban rámutattak, hogy az RCP8.5 forгатókönyvet egy szélsőségesen legrosszabb esetként dolgozták ki, és a „szokásos üzletmenet” alapjául való helytelen használata számos félrevezető tanulmányhoz és médiabeszámolóhoz vezetett.

Az RCP8.5 forгатókönyv valószínűtlenségét Burgess et al. (2021) részletes vizsgálatnak vetette alá. Az RCP8.5 valószínűtlenségét nem szabad *nagyon valószínűtlennek* (pl. 95. percentilisnek) vagy „legrosszabb esetnek” tekinteni, hanem inkább valóban valószínűtlennek, mivel a 8,5 W/m²-es kényszerhez szükséges bemenetek igen valószínűtlenek. Megjegyezték, hogy az RCP8.5 máris eltért az energiafelhasználás megfigyelt trendjétől, és a közeli jövőre vonatkozó trend élesen eltér a Nemzetközi Energiaügynökség (IEA) trendjétől, ami az elkövetkező évtizedekre piaci alapú energiafelhasználási előrejelzéseket ad. Pielke Jr. et al. (2022) kimutatta továbbá, hogy az IEA történelmi és előrejelzési trendjei az alján helyezkednek el mind az RCP-előrejelzések, mind a frissebb Megosztott Társadalmi-gazdasági Útvonal (SSP) forгатókönyv alsó burkológörbéinek.

Schwalm et al. (2020) azzal védtek az RCP8.5 használatát, hogy a 2005–2020 közötti kumulatív CO₂-kibocsátás inkább követi ezt, mint az alacsonyabb RCP-forгатókönyveket. Azt is állítják, hogy az elkövetkező évtizedekben az IEA-forгатókönyvek módosított változata szorosan követi az RCP8.5-öt. Hausfather és Peters (2020b) válaszukban azt mondták, hogy az RCP8.5 képessége az említett 15 évben az üzemanyag-felhasználásból és a földhasználat-változásból eredő CO₂-reprezentációban előforduló hibák eltüntetésének következménye, és az IEA-val való látszólagos egyezés az elkövetkező évtizedekben Schwalm et al. érdeme, akiknek a földhasználati kibocsátásra túl magas járulékos tényezőt vezettek be. Az IEA saját előrejelzett CO₂-kibocsátása jóval alatta marad az RCP8.5-nek.

Az RCP8.5 széles körű, szakpolitikai kiindulási alapként való használata aggodalomra okot adó tendenciát teremtett az éghajlatváltozás hatásaival foglalkozó szakirodalomban. A probléma mértékét Pielke Jr. és Ritchie (2020) szakirodalmi elemzése is megerősítette. Megállapították, hogy 2010 és 2020 között mintegy 16 800 tudományos cikk alkalmazta az RCP8.5 forгатókönyvet, amelyek közül körülbelül 4500 az „üzletmenet a szokásos módon” koncepciójához kötötte az RCP8.5-öt. Elemzésük kimutatta, hogy az RCP8.5-öt nemcsak az egyes kutatók használták rosszul, hanem olyan befolyásos tudományos ügynökségek is visszaéltek az RCP8.5-tel, mint az IPCC és az Egyesült Államok Nemzeti Éghajlatváltozási Értékelése (USNCA). Mindez a fősodrátú médiában azon nyomban félrevezető tudósításokhoz vezetett.

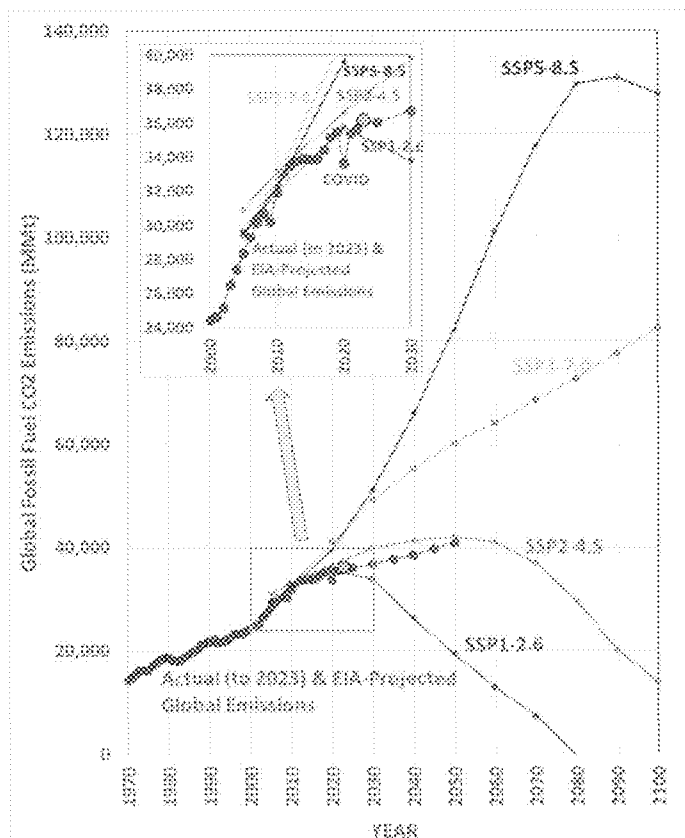
¹ Ez a szélsőséges forгатókönyv hasznos a modellezők számára, ugyanis ha a kényszerítő tényező nagy, az nagy választ (felmelegedést) generál, ami megkönnyíti a modell érzékenységének felmérését. De ez egészen más, mint azt állítani, hogy ez egy valószínű jövőbeli kimenetel.



3.2.1 ábra: AZ 1970-es évek óta az kibocsátásra és a koncentrációra vonatkozó, egymást követő előrejelzések (színes vonalak) következetesen túlbecsülték a méréseket (fekete vonal). Forrás: Hausfather et al. (2019) S4. ábra

Pielke és Ritchie (2020) arról számoltak be, hogy az RCP8.5-öt használó új tanulmányok száma napi 20 volt, amelyek közül körülbelül napi kettő kifejezetten összekötötte az RCP8.5-öt és a „szokásos üzletmenetet”. Arra a következtetésre jutottak, hogy az klímakutató közösség egy teljes évtizedet töltött azzal, hogy „tudományos erőforrásokat sci-fi”, és hogy „a tudományos szakirodalom apokaliptikus irányban kiegyensúlyozatlanná vált”.

Az IPCC új forgatókönyveket dolgozott ki az AR6-hoz, a „Megosztott társadalmi-gazdasági út” (SSP) forgatókönyveket, amelyekben az RCP és SRES forgatókönyvekben mutatott torzítás tovább folytatódott. A 3.2.2. ábra a Nemzetközi Energiaügynökség (IEA) által összeállított teljes globális megfigyelt CO₂-kibocsátást mutatja, egyesítve az IEA kibocsátási előrejelzésével, figyelembe véve az energiateljesítményi előrejelzéseket és a jelenlegi politikákat. A többi vonal az IPCC SSP-forgatókönyveinek tartományát (SSP1-SSP5) mutatja. 2023-tól a globális CO₂-kibocsátás jóval az SSP7.0 alatt maradt, sőt az SSP2-4.5-nek is alá került.



3.2.2. ábra: Megfigyelt és előrejelzett CO₂-kibocsátás. Forrás: IPCC (SSP scenáriók) és Energy Information Administration (EIA). Zöld: megfigyelt történelmi kibocsátás és az EIA előrejelzése. Egyéb vonalak: SSP1-5. Adatforrás: Friedlingstein et al. (2024).

3.2.2 A kibocsátásokhoz és a koncentrációkhoz kapcsolódó szén ciklus

A fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből (valamint kisebb mértékben az erdőirtásból és a cementgyártásból) származó szén-dioxid-kibocsátás a légkör CO₂-koncentrációjának folyamatos emelkedéséhez vezetett, amint azt a 3.1.3. ábra mutatja. A kibocsátások és a koncentráció közötti kapcsolatot a szárazföldi és óceáni folyamatok globális szén ciklusa határozza meg, amelyek során a légkörrel szén-csere történik. E folyamatok megértéséhez Crisp et al. (2021) segített hozzá.

A Föld légkörében körülbelül 850 Gt szén (GtC) található², szinte teljes egészében CO₂ formájában. Ebből a szénből a biológiai folyamatok (növényi növekedés és -lebomlás) és a fizikai folyamatok (óceáni abszorpció és gázkibocsátás) évente körülbelül 200 GtC-t cserélnek ki a Föld felszínével (nagyjából 80 GtC-t a kontinensekkel és 120 GtC-t az óceánokkal). Mielőtt az emberi tevékenység jelentőssé vált, a légkörből való kivonódás nagyjából egyensúlyban volt a hozzáadódással.

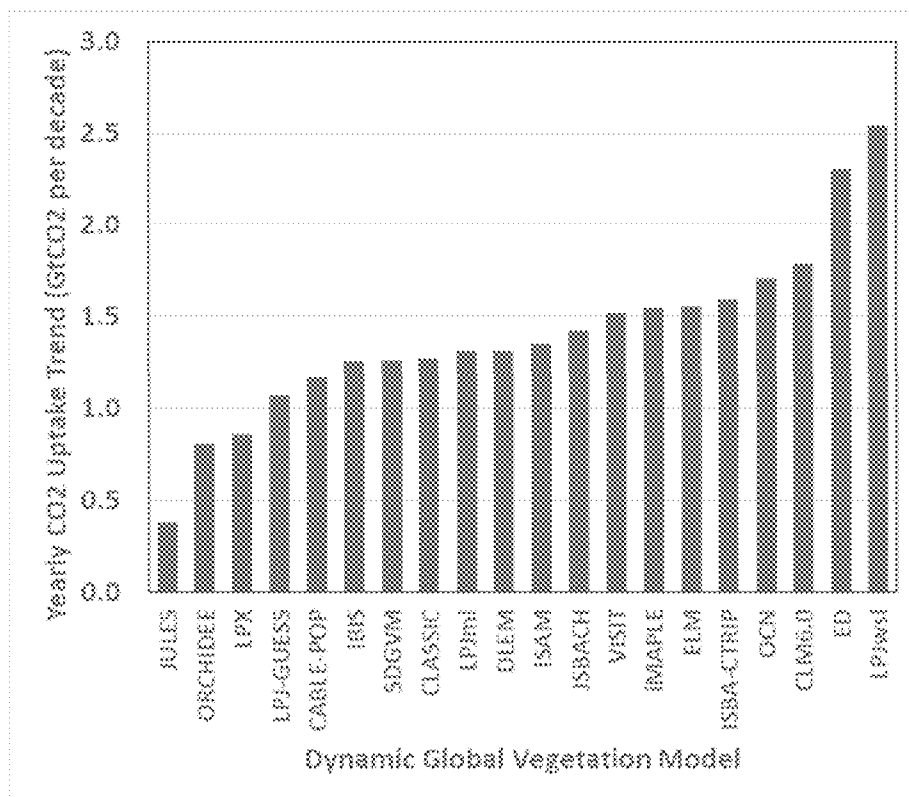
A fosszilis tüzelőanyagok (szén, olaj és gáz) elégetése azonban kivonja a szenet a talajból, és hozzáadja azt a légkörrel történő évi cseréhez. Ez a többlet (a cementgyártás sokkal kisebb hozzájárulásával együtt) 2023-ban 10,3 GtC-t tett ki, ami a légkörrel végbement éves csere mindössze 5 százaléka.

² Mivel a CO₂ a szén ciklus során kémiai átalakul, kényelmesebb a CO₂ molekulái helyett a szénatomokat nyomon követni. Egy gigatonna szén (GtC) körülbelül 3,7 Gt CO₂-nek felel meg.

A szén ciklus az emberiség kis éves szén-dioxid-befecskendezésének körülbelül 50 százalékát teszi ki azáltal, hogy azt a növények növekedése és az óceáni felvétel természetes módon megköti, míg a fennmaradó rész felhalmozódik a légkörben (Ciais et al., 2013). Emiatt a légköri CO₂-koncentráció éves növekedése átlagosan csak körülbelül a fele annak, amit az emberi kibocsátásokból naivan várnánk. A légkör jövőbeli CO₂-koncentrációjának, és így az éghajlatra gyakorolt jövőbeli emberi hatásoknak az előrejelzéséhez fontos tudni, hogy a jövőben miként változhat a szén ciklus. Az 50 százalékos arány történelmileg közel állandósága azt jelenti, hogy minél több CO₂-t termelt az emberiség, annál gyorsabban távolította el a természet a légkörből. Ez az 50 százalékos arány az El Niño, a La Niña és a változó időjárási mintázatok okozta természetes szén ciklus-egyensúlyhiányok miatt évről-évre némileg változik. A Pinatubo-hegy 1991-es kitörése után a légköri CO₂ mennyisége is jelentősen csökkent, ami egy érdekes eredmény, és ezidáig még nem sikerült megmagyarázni (Angert et al., 2004). A légkörből a felesleges CO₂-t eltávolító fő folyamatok közé tartozik a szárazföldi növényzet fokozott növekedése (különösen a magas földrajzi szélességeken), a talaj szénmegkötésének némi növekedése, valamint az óceán általi CO₂-felvétel a légköri CO₂ parciális nyomásának növekedése miatt az óceánban oldott CO₂ nyomásához képest. A Globális Szén Projekt (Friedlingstein et al., 2024) által nyomon követett mind a húsz szárazföldi szén ciklus-modell azt mutatja, hogy a szárazföldi folyamatok 1959 óta egyre növekvő ütemben vonják el a felesleges CO₂-t. Ez összhangban van az 1982 óta műholdakkal megfigyelt „globális zöldülés” jelenségével (2.1. fejezet). Míg a szárazföldi növényzet pozitívan reagál a légköri CO₂-többletre, az óceáni biológiai folyamatok általi többlet CO₂-felvétele túl bizonytalan ahhoz, hogy megbízhatóan mérhető legyen. Az itt leírt ismeretek és számos további szén ciklus-folyamat leírása Crisp et al. (2021) összefoglalójában található.

CO₂-felvétel szárazföldi folyamatok által

A légkörből származó többlet CO₂ szárazföldi felszíni folyamatok általi felvételét (ahogyan azt a globális zöldülésből is következtetjük) 20 különféle dinamikus globális vegetációs modellel modellezték, amelyek eredményeit a Globális Szén Projekt (Friedlingstein, 2024) minden évben frissíti. Amint a 3.2.3. ábrán is látható, ezek a modellek egyetértenek abban, hogy a növényzet és a talaj megköti a szén a légkörből. Azt is látjuk azonban, hogy az 1959 és 2023 közötti (65 év) hosszú távú trendekben a modellek nagymértékben (közel hétszeres szorzótényezővel) különböznek egymástól. Mindez azt mutatja, hogy továbbra is jelentős bizonytalanság van abban, hogy a szárazföldi folyamatok milyen gyorsan távolítják el a CO₂-t a légkörből, ami viszont bizonytalanságot szül a jövőbeli légköri CO₂-koncentrációt illetően, ami pedig bizonytalanná teszi a jövőbeli éghajlatváltozás klímamodel-szimulációit is.

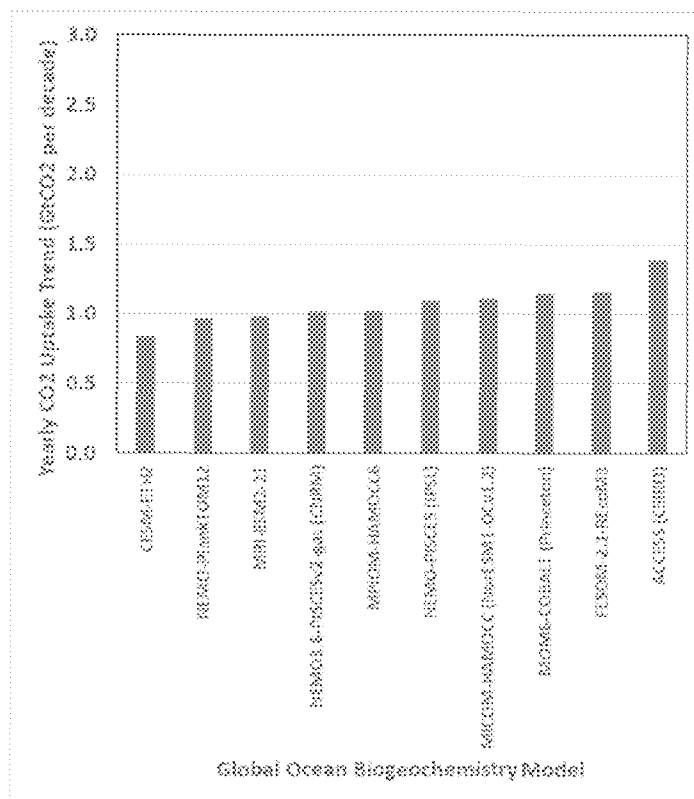


3.2.3 ábra: Szárazföldi folyamatok általi éves CO₂-felvétel (GtCO₂/év) 1959-2023 között, 20 különféle dinamikus globális vegetációmóddal, valamint a Globális Karbon Projekt (GCP) rendszeresen közzétett adatai alapján (Friedlingstein, 2024).

CO₂-felvétel óceáni folyamatok által

Az óceáni folyamatok légkörből történő többlet CO₂-felvételét 10 különböző óceáni biogeokémiai modell segítségével modellezték. Az eredményeket a Globális Szén Projekt (Friedlingstein, 2024) minden évben frissíti. A szárazföldi modellek eredményeihez hasonlóan az összes óceáni modell egyetért abban, hogy a globális óceánok 1959 és 2023 között egyre nagyobb ütemben vontak ki szén a légkörből (3.2.4. ábra). A szárazföldi modellekkel ellentétben azonban az óceáni modellek sokkal jobb egyezést mutatnak egymással, a leggyorsabban növekvő CO₂-felvételt produkáló modell mindössze 65 százalékkal gyorsabb, mint a leglassabban növekvő CO₂-felvételt produkáló modell. A modellek közötti relatív egyezés ellenére Friedlingstein et al. (2022) megjegyzi, hogy az elmúlt évtizedben jelentős eltérés mutatkozik a különböző módszerek között az óceáni elnyelődés erősségét illetően, különösen a Déli-óceánon (az Antarktiszi-óceánon).

Megjegyzendő, hogy a 3.2.3. ábrán látható összes szárazföldi modellben a CO₂-felvétel átlagos trendje 25 százalékkal nagyobb, mint az óceáni felvétel átlagos trendje. Ez arra utal, hogy a szárazföldi folyamatok gyorsabban képesek a levegőből eltávolítani a CO₂-t, mint az óceáni folyamatok.



3.2.4 ábra: Az éves CO₂-felvétel (GtCO₂/év) az óceáni folyamatok által 1959-2023 között, 10 különféle dinamikus globális biogeokémiai modellel, valamint a Globális Karbon Projekt (GCP) rendszeresen közzétett adatai alapján (Friedlingstein, 2024).

3.3 Az urbanizáció hatása a hőmérsékleti trendekre

A szárazföldi történelmi hőmérsékleti adatokat főként ott gyűjtötték, ahol emberek élnek. Ez felveti azt a problémát, hogy hogyan lehet kiszűrni a városi hőszigetek (UHI) és a kontinensfelszín egyéb változásai miatt jelentkező nem éghajlatváltozás-eredetű felmelegedési jeleket. Ha ezeket nem távolítják el, az adatok túlzott mértékben tulajdoníthatják üvegházhatású gázoknak a megfigyelt felmelegedést. Az IPCC elismeri, hogy a nyers hőmérsékleti adatok UHI-hatásokkal szennyezettek, de azt állítja, hogy rendelkeznek olyan adattisztítási eljárásokkal, amelyek ezeket eltávolítják. Nyitott kérdés, hogy ezek az eljárások megfelelőek-e.

Az AR6 elbagatelizálta ezt a problémát azzal, hogy (WGI 235. o.) azzal, hogy nem merült fel újabb bizonyíték, amely megváltoztatná az AR5 megállapítását, miszerint az urbanizáció a globális szárazföldi felszín felmelegedési trendjében legfeljebb 10 százalékos felfelé irányuló torzítást okoz. Az AR5 (WGI 189. o.) szintén a 10 százalékos felső határt idézte, forrásmegjelölés nélkül. Az AR4 (WGI 244. o.) az állítás alapjául Jones et al. (1990) és Peterson et al. (1999) munkáira hivatkozott. Peterson et al. nem találtak különbséget a vidéki és a városi minták közötti trendekben, bár a „vidék”-re vonatkozó definíciójuk az volt, hogy a lakosság száma legfeljebb 10 000 fő, míg az urbanizáció relatív hatása jóval ez alatt elkezdődik (Spencer et al., 2025). Jones et al. a vidéki/városi felmelegedést három régióban hasonlította össze: Kelet-Ausztráliában, Kelet-Kínában és a Szovjetunió nyugati részén. „Vidék” definíciójuk a volt Szovjetunióban legfeljebb 10 000 lakosság volt, míg Kínában legfeljebb 100 000. Ezeken a területeken 10 százaléknál nagyobb relatív felmelegedési torzítást találtak, de azt feltételezték, hogy az általuk nem vizsgált területek átlagolt urbanizációs hatása a globális szárazföldi torzítást a megfigyelt felmelegedési trend 10 százaléka alá csökkentené.

Az IPCC AR4 előtt számos tanulmány jelent meg nyomtatásban, amelyek azt állították, hogy az UHI-k felmelegedési hatása a megfigyelt felmelegedéshez viszonylag nagy (30–50%-os) hozzájárulást adott, és ez a klímamodel-szimulációkból kimaradt (de Laat és Maurellis 2006, McKittrick és Michaels 2007). Ezek az eredmények a szárazföldi maximális felmelegedés helyszínei és a maximális társadalmi-gazdasági fejlődés helyszínei közötti korreláción alapultak. Az AR4 jelentés (244. o.) azt állította, hogy ezek a korreláció a természetes légköri cirkuláció műterméke, és valójában statisztikailag jelentéktelen, és ezen az alapon eltekintett az eredmények figyelembevételétől. Ez az állítás vitatható, mivel nem mutattak fel semmiféle bizonyítékot. McKittrick (2010), valamint McKittrick és Nierenberg (2010) kimutatták, hogy a korrelációra vonatkozó különféle alternatív magyarázatok nem befolyásolják a korreláció jelentőségét. Az AR5 jelentés (189. o.) elismerte, hogy az AR4 „nem szolgáltatott explicit bizonyítékot” az értékeléshez, és ezen dokumentumok alapján elismerte, hogy „jelentős bizonyíték van az adatok ilyesféle szennyeződésére”, azaz a szárazföldi adatokban felmelegedési torzításra utal. Azonban, ahogy már említettük, az AR5 jelentés többi részében fenntartották az AR4 állítását, miszerint ez a megfigyelt felmelegedés kevesebb mint 10 százaléka. Továbbá nem adtak figyelmeztetést a szárazföldi adatok éghajlati mérésekre való felhasználásával kapcsolatban, annak ellenére, hogy elismerték az UHI szennyeződés bizonyítékait. Nemrégiben Soon et al. (2023) azt becsülte, hogy az északi félteke szárazföldi hőmérsékletváltozási adataiban az 1850–2018 közötti urbanizációs torzítás elegendő volt ahhoz, hogy a kevert (városi+ vidéki) adatok trendje évszázadonként 0,55°C-ról 0,89°C-ra növekedjen.

Néhány, az UHI szennyezés ellen bizonyítékot nyújtó tanulmány összehasonlította a vidéki és városi helyszínek felmelegedési ütemét (Jones et al. 1990, Peterson et al. 1999, Wickham et al. 2013). Nem ismert, hogy az efféle módszerek képesek lennének-e kimutatni az UHI torzítást akkor is, ha az jelen van. Az UHI felmelegedés hatása a népesség függvényében logaritmikusan viselkedik, más szóval kis népsűrűség esetében a legerősebb, majd a helyi urbanizáció kiterjedésével egyenletesebb lesz (Oke 1973, Spencer et al. 2025). Ezért az, hogy nem találtak különbséget a városi és vidéki állomások felmelegedési ütemében, nem bizonyítja az UHI szennyezés hiányát. McKittrick (2013) empirikus bizonyítékot szolgáltatott arra, hogy a vidéki/városi trend egy olyan adathalmazban, amelyről más alapon kimutatták, hogy UHI torzítással szennyezett, nem különbözik szignifikánsan egymástól.

Parker (2006) városi helyszínekből vett minták vizsgálatával a trendekben nem talált eltérést az éjszakai szélsőbesség szerint felosztott részhalmazok között, és ennek alapján arra a következtetésre jutott, hogy az urbanizáció nem lehet szignifikáns tényező. Itt ismét az a kérdés, hogy egy ilyen módszer kimutatná-e az UHI torzítását, még ha jelen is lenne. McKittrick (2013) bemutatott egy olyan példát, amelyben az UHI-val szennyezett adatok nem mutattak szignifikáns trendkülönbségeket a szélsőbesség szerinti csoportosítás alapján.

Az UHI torzítás mérésének kihívása az, hogy a helyi hőmérsékletváltozást a népesség vagy az urbanizáció megfelelő változásához kellene kötni, és nem egy statikus osztályozási változóhoz, például ahhoz, hogy vidéki vagy városi. Spencer et al. (2025) egy ilyen elemzés elvégzéséhez újonnan elérhető történelmi népességi archívumokat használt fel, és az amerikai nyári hőmérsékleti adatokban jelentős UHI torzításra talált bizonyítékot.

Összefoglalva: a szárazföldi hőmérsékleti megfigyelésben ugyan egyértelműen kimutathatóak felmelegedésből adódó változások, arra is utalnak bizonyítékok, hogy az urbanizációs mintázatok e tendenciát felfelé torzítják, és hogy ezeket a torzításokat az éghajlati adatkészletek előállításához használt adatfeldolgozó algoritmusok nem szüntették meg teljesen.

Hivatkozások

Angert, A., S. Biraud, Bonfils, C., Buermann, W. and I. Fung (2004). CO2 seasonality indicates origins of post-Pinatubo sink. *Geophysical Research Letters* 31.
<https://doi.org/10.1029/2004GL019760>

- AR6: Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- AR5: Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (2013) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- AR4: Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report (2007) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- Burgess, Matthew et al (2021) Environmental Research Letters 16 014016
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abcdd2/meta>
- Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, et al. (2013): Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Connolly, Roman, Willie Soon, Michael Connolly et al. (2021) How much has the Sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate Research in Astronomy and Astrophysics 21(6) doi: 10.1088/1674-4527/21/6/131
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4527/21/6/131>
- Crisp, David & Dolman, Han (A.J.) & Tanhua, Toste & McKinley, Galen & Hauck, Judith & Bastos, Ana & Sitch, Stephen & Eggleston, Simon & Aich, Valentin. (2022). How Well Do We Understand the Land-Ocean-Atmosphere Carbon Cycle?. Reviews of Geophysics. 60. 10.1029/2021RG000736.
- De Laat, A.T.J., and A.N. Maurellis (2006), Evidence for influence of anthropogenic surface processes on lower tropospheric and surface temperature trends, International Journal of Climatology 26:897—913.
- Friedlingstein, P., and 95 co-authors (2024): Global Carbon Budget 2024, Earth System Science Data 14(4), <https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2024-519>
- Hausfather et al. (2019) “Evaluating the Performance of Past Climate Model Projections” Geophysical Research Letters 47(1) <https://doi.org/10.1029/2019GL085378>
- Hausfather, Z. and G. Peters (2020a) “Emissions – the ‘business as usual’ story is misleading” Nature 29 January 2020 <https://www.nature.com/articles/d41586-020-00177-3>
- Hausfather, Z. and G. Peters (2020b) RCP8.5 is a problematic scenario for near-term emissions. Proceedings of the National. Academy of Sciences 117, 27791–27792 (2020)
- Jenkins, S., Smith, C., Allen, M. et al. Tonga eruption increases chance of temporary surface temperature anomaly above 1.5 °C. Nature Climate Change. 13, 127–129 (2023).
<https://doi.org/10.1038/s41558-022-01568-2>
- Jones, P. D., P. Y. Groisman, M. Coughlan, N. Plummer, W.-C. Wang, and T. R. Karl (1990), Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land, Nature, 347, 169 – 172
- Liu, Pengfei et al. (2021) “Improved estimates of preindustrial biomass burning reduce the magnitude of aerosol climate forcing in the Southern Hemisphere” Science Advances 7(22) May 2021
<https://doi.org/10.1126/sciadv.abc1379>
- McKittrick, R.R. and P.J. Michaels (2007), Quantifying the influence of anthropogenic surface processes and inhomogeneities on gridded global climate data, Journal of Geophysical Research, 112, D24S09, doi:10.1029/2007JD008465.

- McKittrick, Ross R. (2010) Atmospheric Oscillations Do Not Explain the Temperature-Industrialization Correlation. *Statistics Politics and Policy* Vol 1. No. 1., July 2010
- McKittrick, Ross R. (2013) Encompassing Tests of Socioeconomic Signals in Surface Climate Data. *Climatic Change* doi 10.1007/s10584-013-0793-5. Volume 120, Issue 1-2. <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10584-013-0793-5>
- McKittrick, Ross R. and Nicolas Nierenberg (2010) Socioeconomic Patterns in Climate Data. *Journal of Economic and Social Measurement*, 35(3,4) pp. 149-175. DOI 10.3233/JEM-2010-0336
- McKittrick, Ross R., Mark Strazicich and Junsoo Lee (2012) “Long-Term Forecasting of Global Carbon Dioxide Emissions: Reducing Uncertainties Using a Per-Capita Approach.” *Journal of Forecasting*, Vol 32, Issue 5, pp 435-451 DOI: 10.1002/for.2248.
- Oke, T.R., 1973: City size and the urban heat island, *Atmospheric Environment* 7, 769-779
- Parker, D.E. (2006) “A Demonstration that Large-Scale Warming is not Urban.” *Journal of Climate* 19:2882—2895.
- Peterson, Thomas C., Kevin P. Gallo, Jay Lawrimore, Timothy W. Owen, Alex Huang, David A. McKittrick (1999) Global rural temperature trends. *Geophysical Research Letters* February 1999 <https://doi.org/10.1029/1998GL900322>
- Pielke Jr., Roger and Ritchie, Justin (2020) “Systemic Misuse of Scenarios in Climate Research and Assessment” *Social Sciences Research Network* April 2020, available at: <https://ssrn.com/abstract=3581777>
- Pielke Jr, R., Burgess, M. G., & Ritchie, J. (2022). Plausible 2005-2050 emissions scenarios project between 2 and 3 degrees C of warming by 2100. *Environmental Research Letters* 17 024027 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac4ebf/pdf>
- Scaffeta, Nicola, Richard C. Willson, Jae N. Lee and Dong Wu (2019) Modeling Quiet Solar Luminosity Variability from TSI Satellite Measurements and Proxy Models during 1980–2018. *Remote Sensing* 11(21) 2569 <https://doi.org/10.3390/rs11212569>
- Schoeberl, M.R., Y. Wang, G. Taha, D.J. Zawada, R. Ueyama and A. Dessler, 2024. Evolution of the climate forcing during the two years after the Hunga Tonga-Hunga Ha’apai eruption. *Journal of Geophysical Research*, 129.
- Schwalm, C.R., S. Glendon, P. B. Duffy (2020) RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.* 117, 19656–19657 (2020). Soon, W.; Connolly, R.; Connolly, M.; Akasofu, S.-I.; Baliunas, S.; et al. (2023) The Detection and Attribution of Northern Hemisphere Land Surface Warming (1850–2018) in Terms of Human and Natural Factors: Challenges of Inadequate Data. *Climate* 2023, 11, 179. <https://doi.org/10.3390/cli11090179>
- Spencer, Roy W, John R Christy and William D. Braswell (2025) Urban Heat Island Effects in U.S. Summer Surface Temperature Data, 1895–2023 *Journal of Applied Meteorology and Climatology* April 2025 <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-23-0199.1>
- Wickham C, R Rohde , RA Muller, J Wurtele, J Curry, et al. (2013) Influence of Urban Heating on the Global Temperature Land Average using Rural Sites Identified from MODIS Classifications. *Geoinformatics and Geostatistics: An Overview* 1:2.
- Zacharias, Pia (2014) An Independent Review of Existing Total Solar Irradiance Records. *Surveys in Geophysics* 35 pp. 897—912 <https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-014-9294-y>

II. RÉSZ: A CO₂-KIBOCSÁTÁSRA ADOTT KLÍMAVÁLASZ

4 A CO₂-KÉNYSZER KLÍMAÉRZÉKENYSÉGE

Fejezet-összefoglaló

Egyre erősödik az a felismerés, miszerint a klímamodellek alkalmatlanok az emelkedő CO₂-koncentráció hatására fellépő ún. egyensúlyi klímaérzékenység (ECS) meghatározására. Az IPCC adatalapú megközelítések felé fordult, beleértve a történelmi adatokat és a paleoéghajlati rekonstrukciókat, de ezek megbízhatóságát adatokhiányok korlátozzák.

Az adatalapú klímaérzékenység (ECS) értékek általában alacsonyabbak, mint a klímamodellekből származók. Az IPCC AR6 az ECS valószínű tartományára vonatkozóan felső határként 4,0°C-ot ad meg, ami alacsonyabb, mint az AR5 4,5°C-os értéke. Úgy tűnik, hogy a felső határ csökkentését a paleoéghajlati adatok kellően alátámasztják. Az AR6 alsó határa az ECS valószínű tartományára vonatkozóan 2,5°C, ami lényegesen magasabb, mint az AR5 1,5°C-os értéke. Az alsó határ emelése kevésbé indokolt; az AR6 óta előkerült bizonyítékok szerint a *valószínű* tartomány alsó határa 1,8°C körüli értékre tehető.

4.1 Bevezetés

Az éghajlat emelkedő CO₂-koncentrációra adott válaszána nagysága az antropogén klímaváltozásról szóló tudományos vitában, így a „klímapolitikai fellépésről” szóló nyilvános vitában is központi szerepet játszik. Ennek a válasznak a legegyszerűbb mértéke a globális átlagos felszínhőmérséklet emelkedése, amelyet az Egyensúlyi Klímaérzékenység (ECS) számszerűsít. Az ECS-t a CO₂ iparosodás előtti 280 ppm-es koncentrációjához képesti megduplázódására várható felmelegedés mértékeként definiálják, miután minden klímakomponensnek volt ideje az alkalmazkodásra. Egyes összetevők, mint például az alsó légkör (troposzféra) hőmérséklete, gyorsan alkalmazkodnak, míg más összetevők alkalmazkodása, például a mélyóceáné és a krioszféraé, akár évszázadokig is eltarthat. A rövidebb időléptékeket jobban leírja egy kapcsolódó mérőszám, az Átmeneti Klímaválasz (TCR); definíció szerint ez annak a felmelegedésnek a mértéke, amikor a CO₂-koncentráció úgy megduplázódik meg, hogy 70 éven keresztül évi egy százalékos emelkedik.

Az Egyesült Államok Nemzeti Tudományos Akadémiája számára 1979-ben készült Charney-jelentés (National Research Council 1979) azt javasolta, hogy a legvalószínűbb ECS $3,0 \pm 1,5^\circ\text{C}$ legyen. Az IPCC ismételten megerősítette ezt a tartományt, csak kisebb eltérésekkel, egészen a legutóbbi, 6. számú jelentéséig. Az 5. számú jelentés 1,5–4,5 °C-ot jelölt meg valószínű tartományként (66 százalékos valószínűséggel), továbbá kijelentette: rendkívül valószínűtlen, hogy az ECS (95 százalékos valószínűséggel) 1,0 °C alatt legyen, és nagyon valószínűtlen (90 százalékos valószínűséggel), hogy meghaladja a 6,5 °C-ot.

Az ECS bizonytalansága makacsul nagy maradt, annak ellenére, hogy számos egyedi tanulmány a szűkítést állította (Hausfather 2023). Legutóbb az 6. számú jelentés a *valószínű tartományt* 2,5–4,0 °C-ra szűkítette, és a *nagyon valószínű tartományt* 2,0–5,0 °C-nak tekintette. Ez az alsó tartománybeli szűkítés vitatott, amint azt alább tárgyaljuk.

Az ECS bizonytalanságai a politikai döntéshozatal szempontjából nagy jelentőséggel bírnak. Amint azt a 11. fejezetben tárgyaljuk, a gazdasági modellek a CO₂-kibocsátás költségeinek előrejelzésére az ECS értékeit használják. A hagyományos érték (3,0 °C) a CO₂-kibocsátás tekintetében jellemzően szerény globális társadalmi költségekkel járt, ami elegendő volt bizonyos politikai intézkedések igazolására, de ezeket többnyire a század későbbi szakaszára halasztották. Ha az ECS nagyon magas (4,5 °C felett), akkor sürgetőbbé válik az azonnali agresszív kibocsátás-szabályozás, míg 2,0 °C alatti ECS esetén gazdaságilag semmilyen CO₂-kibocsátás-szabályozás nem indokolt (Dayaratna et al. 2017, 2020). Pontos becslést lehetetlen készíteni, ezért a politikai döntéshozatalnak a bizonytalanságot figyelembe kell vennie.

Önmagában a légköri CO₂ megduplázódásának egyensúlyi felmelegedési hatása valamivel több, mint 1 °C (Soden és Held 2006). Az ECS nagyobb értékei már pozitív visszacsatolásokról erednek, amelyek a CO₂ felmelegedését felerősítik. A vízgőz-visszacsatolás pozitív: melegebb légkörben több vízgőz lehet, ami önmagában is erős üvegházhatású gáz. A melegebb hőmérséklet kevesebb hó- és tengeri jégtakarót is eredményez, ami lehetővé teszi a Föld számára, hogy többet nyeljen el a napsugárzásból. Ezen visszacsatolások néhány egyszerű becslése az ECS-t körülbelül 2°C-ra növeli (Sherwood et al., 2020). Az ECS magasabb értékei pozitív felhő-visszacsatolásokkal kapcsolatosak.

Klímakutatók az egyensúlyi klímaérzékenység meghatározásához többféle bizonyítékot használnak:

- Klímodell-szimulációk
- Történelmi megfigyelések
- Paleoklíma-rekonstrukciók
- A visszacsatolások folyamatalapú megértése

4.2 A klímaérzékenység modellalapú becslése

Az IPCC AR4-ben és AR5-ben megadott ECS-tartományokat elsősorban nagyléptékű klímodellek, más néven általános cirkulációs modellek (GCM-ek) viselkedésének vizsgálatával kapták meg. Az IPCC azonban az AR6-ban irányt váltott, amikor egy közvetlenebb, adat alapú módszertan felé fordult. Itt a GCM-ből kiinduló klímaérzékenység-meghatározás használatának néhány buktatóját tárgyaljuk.

Az ECS klímodell-szimulációkból a CO₂ koncentrációját megduplázásával határozható meg úgy, hogy a felmelegedés egyensúlyba kerüléséig több évszázadnyi várakozást is figyelembe vesznek. Az ilyen hosszú szimulációk szükségességének elkerülése érdekében a „tényleges klímaérzékenységet” általában a CO₂ hirtelen megkétszereződését követő 150 éves szimulációból adják meg.

Az ECS elvileg a globális felmelegedési modellek (GCM) a rendszer egészéből levezethető (ún. emergens) tulajdonsága – vagyis nem közvetlenül paraméterezett vagy hangolt, hanem a szimuláció eredményeiben jelenik meg. Az egyébként hihető GCM-eket és paraméterválasztásokat azonban a várható felmelegedési ütemmel való észlelt konfliktus, illetve az elfogadott tartományon kívül eső modell klímaérzékenységével szembeni idegenkedés miatt elvetették (Mauritsen et al. 2012). Ez volt a bevett gyakorlat az AR4-ben használt modellek esetében; a modellezők azonban idővel eltávolodtak ettől. Mauritsen és Roeckner (2020) azonban még egy CMIP6 modellben is a következőket állítják a Max Planck Intézet (MPI) klímodelljükkel kapcsolatban (a kiemelés tőlünk való):

„Dokumentáltuk, miként hangoltuk az MPI-ESM1.2 globális klímodell, hogy az megfeleljen a felmelegedés műszeres adatainak; ez a törekvés egyértelműen sikeres volt. Az események történelmi sorrendje miatt a választás az volt, hogy ezt gyakorlatilag úgy tegyük meg, hogy nem aeroszolkényszer hangolásával, hanem **felhő-visszacsatolások** segítségével körülbelül 3 K-es **ECS-t célozzunk meg.**”

Azaz az MPI modellezők kiválasztották a 3°C-os ECS-értéket, majd a felhőparaméterezéseket a kívánt eredményhez hangolták.

Amint megjegyeztük, a CO₂-megduplázásból eredő közvetlen felmelegedés csak körülbelül 1°C (Soden és Held 2006); a további felmelegedés olyan éghajlati visszacsatolásokról ered, amelyeket a GCM nem explicit módon, hanem fizikai folyamatok paraméterezésén alapulva old meg. Az ECS

magasabb értékei elsősorban pozitív felhő-visszacsatolásokból erednek, miközben a visszacsatolások nagysága és előjele is nagyon bizonytalan. A felhő-visszacsatolás elemei közé tartozik a felhők földrajzi szélességi eloszlásban megmutatkozó változások, a felhőmagasság-eloszlás változásai (alacsony és magas felhők változásai), a felhők halmazállapotának változásai (jég vs. folyadék), a felhőrészecske-méret változásai (az aeroszolrészecskék koncentrációjának és/vagy összetételének változásaival összefüggésben), a felhők csapadékhatékonyságának változásai, sőt még a felhők 24 órás napsütési ciklus szerinti eloszlásának változásai is (Curry és Webster, 1999). A GCM-ek kis léptékük miatt nehezen tudják ezeket a folyamatokat helyesen szimulálni, nemhogy megjósolni, hogyan fognak változni a jövőben. Továbbá a felhőfolyamatok modulálják a vízgőz-koncentrációt, a hőmérséklet-ingadozás mértékét és a felszín albedó-visszacsatolásait.

4.1. ábra: A CMIP6 modellegyüttes 37 klímamodelljének egyensúlyi klímaérzékenysége °C-ban. A különféle modellek azonosítói a vízszintes tengely mentén vannak feltüntetve. Forrás: (Scafetta, 2021)

A modell finomhangolásával és a felhőparaméterezésekre való magas érzékenységgel kapcsolatos aggodalmak miatt az AR6 (2021) az éghajlati érzékenység értékelésében nem az éghajlati modell szimulációira támaszkodott, hanem adatalapú módszerekre.

Az éghajlati érzékenység a felszíni hőmérséklet és az óceáni hőtartalom műszeres adataiból is becsülhető, kombinálva az éghajlati kényszerek (pl. üvegházhatású gázok, napenergia, vulkánkitörések, aeroszolok) múltbeli változásainak becslésével (Otto et al., 2013). Ezen információk felhasználásával egyszerű empirikus energiamérleg-modellt lehet alkalmazni. Ez egy olyan

visszacatolási paraméter becslését igényli, amelynek bizonytalanságai a kapott ECS-ben nagymértékben felerősödnek (Roe és Baker, 2007).

Az adatalapú módszerek pontossága a bemeneti adatok minőségétől függ. Feltételezésekre van szükség az óceánok hőtárolásával kapcsolatban, és jó adatok csak az elmúlt évtizedekre állnak rendelkezésre. A legnagyobb bizonytalanság forrása az aeroszolrészecskék mennyisége és összetétele, valamint azok kölcsönhatása a felhők sugárzási tulajdonságaival (az úgynevezett aeroszol közvetett hatása; lásd a 3.1.1., 3.1.2. ábrákat). Az éghajlati modellek az üvegházhatású gázokra válaszul felmelegedést, az aeroszolokra pedig lehűlést mutatnak (Schwartz et al., 2007). A megfigyelt 20. századi felmelegedés vagy az alacsony ECS-sel és a kismértékű aeroszol lehűléssel, vagy a magas ECS-sel és a magas aeroszol lehűléssel van kimutathatóan összhangban. Mivel a fosszilis tüzelőanyagok használata mind üvegházhatású gázokat, mind aeroszolókat juttat a légkörbe, a CO₂ felmelegítő hatásának elkülönítéséhez mindkét hatást meg kell becsülni.

A paleoklíma- proxikat a Föld hőmérsékletében bekövetkezett paleoéghajlati változások és a kényszerítő tényezők változásaira vonatkozó becslések összehasonlításával a múltbeli éghajlati érzékenység megismerésére is alkalmazzák. A két leginformatívabb időszak az utolsó jégkorszaki maximum (körülbelül 20 000 évvel ezelőtt), ami alatt körülbelül 3–7 °C-kal hidegebb volt, mint ma, és egy középső pliocén időszak (körülbelül hárommillió évvel ezelőtt), aminek folyamán 1–3 °C-kal melegebb volt, mint ma. A legjobb bizonyítékot arra, hogy az éghajlati érzékenység magas értékei valószínűtlenek, az utolsó jégkorszaki maximum idején tapasztalt lehűlés korlátok adják. A paleoklíma-becslés azonban a becsült hőmérsékletekben és kényszerítő tényezőkben egyaránt nagyon nagy bizonytalanságokkal jár. Továbbá a múltbeli éghajlati állapotokon alapuló éghajlati érzékenység becslése nem feltétlenül alkalmazható az éghajlati rendszer jelenlegi állapotára.

Az éghajlati szakirodalomban vissza-visszatérő téma, hogy a történelmi adatokon alapuló ECS-becslés kisebb értéket ad, mint az éghajlati modellekből következtetett ECS-becslés (Sherwood és Forest 2024). A 2012 és 2024 közötti lektorált szakirodalomban körülbelül 15, historikus adatokon alapuló becslés jelent meg, amelyek az ECS legjobb becslését 1,0 °C és 2,5 °C között adták, bár a kritikusok megkérdőjelezték néhány módszert, valamint az adatok minőségét is. Az AR6 esetében az IPCC elsődlegesen Sherwood et al. (2020) eredményein alapul, amelyek a historikus adatokat és a paleoklimatikus közelítő értékeket folyamatalapú megközelítéssel kombinálták, és legjobb becslésre 3,1 °C-ot kaptak, 2,6-3,9 °C közötti valószínű tartománnyal. Lewis (2022) számos aggályt fogalmazott meg ezzel az eredménnyel kapcsolatban, beleértve a módszertani hibákat, az elavult bemeneti értékeket és a szubjektív Bayes-előfeltevések használatát az elemzésben. Lewis elemzése megállapította, hogy az éghajlati érzékenységre sokkal alacsonyabb becsült értékek és sokkal szűkebb korlátok adódnak, mint amik kijöttek a Sherwood et al. által végzett elemzésből. A medián 2,2°C (1,8–2,7°C a 17–83 százalékos valószínűségi tartományban, és 1,6–3,2°C az 5–95 százalékos, nagyon valószínű tartományban). Az IPCC AR6 mindössze 5 százalékos valószínűséget becsült arra, hogy az ECS 2,3°C alatt lesz, míg ugyanezt Lewis 50 százalék felettire becsülte. A Sherwood et al., valamint Lewis közötti vitáról szóló legfrissebb publikációk tovább védik álláspontjukat: Sherwood és Foster (2024), valamint Lewis (2025).

Az AR6-ban hangsúlyozott érv szerint az adatalapú ECS-becslések az úgynevezett „mintázathatás” miatt alábecsülhetik az üvegházhatású gázokra adott jövőbeli felmelegedési reakciót (Forster et al., 2021). Úgy vélik, hogy a Csendes-óceán trópusi részén erősen befolyásolja a Föld ürbe történő hősugárzásának általános hatékonyságát, de egyes régiók hatékonyabban távolítják el a hőt, mint mások. Ha a trópusi Csendes-óceán nyugatról keletre irányuló hőmérsékleti gradiense egy melegebb éghajlatban gyengül, a felmelegedés ott koncentrálódik, ahol a hő kevésbé hatékonyan távolítható el, növelve az ECS-t.

A legtöbb klímamodell azt szimulálja, hogy az emelkedő koncentrációjú üvegházgázok gyengítik a nyugat-keleti hőmérsékleti gradienst, ami arra késztette az IPCC-t az AR6-ban, hogy arra a következtetésre jusson, hogy az adatalapú ECS-becslések a jövőbeni ECS-értéket alábecsülték. Seager et al. (2019) azonban rámutatott arra, hogy - a modellekkel ellentétben - a nyugat-keleti hőmérsékleti gradiens az idő múlásával erősödött. Azzal is érveltek, hogy a klímamodellekben ennek az ellenkezőjét előrejelző mechanizmus az óceáni dinamika hibás jellemzésén alapult, és nincs ok arra,

hogy a gradiens gyengüljön. Hasonló érvet fogalmazott meg nemrégiben Lee et al. (2024). E tanulmány arra a következtetésre jutott, hogy „a megfigyelt trend íve az erősödő légköri ÜHG-terhelésre adott választ tükrözi”; más szóval, az ÜHG-felmelegedésnek a hőmérsékleti gradiens jövőbeni erősödéséhez, nem pedig gyengüléséhez kellene vezetnie. A légköri hűtés egyre erősebb hatékonysága azzal jár, hogy a jövőbeni ECS egy melegebb éghajlaton *alacsonyabb* lehet a jelenlegi becsléseknél.

4.4 Tranziens klímaérzékenység

Az átmeneti klímaválasz (TCR) az éghajlati érzékenységre vonatkozóan hasznosabb megfigyelési korlátot biztosít. A TCR az a globális hőmérséklet-emelkedés, amely akkor következik be, amikor a CO₂-szint 70 éven keresztül évi 1 százalékkal növekszik (azaz fokozatosan duplázódik meg). Az ECS-hez képest a megfigyeléssel meghatározott TCR-értékek elkerülik az óceáni hófelvétel bizonytalanságainak problémáit és a hosszabb távú visszacsatolási folyamatok (pl. jégtagarók) időléptékeiből adódó egyensúlyi állapotok meghatározásának homályos határát. A TCR-t jobban korlátozza a történelmi felmelegedés, mint az ECS-t. Az AR6 a TCR nagyon valószínű tartományát 1,2–2,4 °C-nak becsülte. Az ECS-sel ellentétben a TCR felső határa szigorúbban korlátozott. Összehasonlításképpen, a Lewis (2023) által meghatározott TCR-értékek 1,25–2,0 °C között vannak, ami sokkal jobb egyezést mutat az AR6 értékekkel, mint amit az ECS-értékek összehasonlításakor láthattunk.

Hivatkozások

- Carbon Brief. (2020, July 22). Explainer: How scientists estimate climate sensitivity. <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-scientists-estimate-climate-sensitivity>
- Carbon Brief. (2020, July 22). Guest post: Why low-end ‘climate sensitivity’ can now be ruled out. <https://www.carbonbrief.org/guest-post-why-low-end-climate-sensitivity-can-now-be-ruled-out>
- Carbon Brief. (2021, August 9). In-depth Q&A: The IPCC’s sixth assessment report on climate science. <https://www.carbonbrief.org/in-depth-qa-the-ipccs-sixth-assessment-report-on-climate-science>
- Chen, D., et al. (2021). Framing, context, and methods. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Curry, J. A., & Webster, P. J. (1999). Thermodynamic feedbacks in the climate system. In *Thermodynamics of atmospheres and oceans* (pp. 351–385). Academic Press.
- Dayaratna, Kevin, Ross McKittrick and David Kreutzer (2017) Empirically-Constrained Climate Sensitivity and the Social Cost of Carbon. *Climate Change Economics* April 2017 DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S2010007817500063>
- Dayaratna, Kevin, Ross McKittrick and Patrick J. Michaels (2020) Climate Sensitivity, Agricultural Productivity and the Social Cost of Carbon in *FUND*. *Environmental Economics and Policy Studies* <https://doi.org/10.1007/s10018-020-00263-w>
- Forster, P., et al. (2021). The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Hausfather, Z. (2020, July 22). Explainer: How scientists estimate climate sensitivity. Carbon Brief. <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-scientists-estimate-climate-sensitivity>
- Lan, X., Tans, P., & Thoning, K. W. (2025). Trends in globally-averaged CO₂ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. NOAA Global Monitoring Laboratory. <https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07>

- Lee, S., Byrne, M. P., Loikith, P. C., & O'Dell, C. W. (2024). Zonal contrasts of the tropical Pacific climate predicted by a global constraint. *Climate Dynamics*, 62(1–2), 229–246. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06741-7>
- Lewis, N. (2023). Objectively combining climate sensitivity evidence. *Climate Dynamics*, 61(9–10), 3155–3163. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06398-8>
- Lewis, N. (2025). Comment on “Can uncertainty in climate sensitivity be narrowed further?” by Sherwood and Forest (2024). *EGUsphere* [preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1179>
- Thorsten Mauritsen et al., (2012) “Tuning the Climate of a Global Model,” *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 4, no. 3 <https://doi.org/10.1029/2012ms000154>
- Mauritsen, T., & Roeckner, E. (2020). Tuning the MPI-ESM1.2 global climate model to improve the match with instrumental record warming by lowering its climate sensitivity. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, e2019MS002037. <https://doi.org/10.1029/2019MS002037>
- Otto, A., Otto, F. E. L., Boucher, O., Church, J., Hegerl, G., Forster, P. M., Gregory, J. M., & Johnson, G. C. (2013). Energy budget constraints on climate response. *Nature Geoscience*, 6(6), 415–416. <https://doi.org/10.1038/ngeo1836>
- Pachauri, R. K., & Meyer, L. (Eds.). (2015). *Climate change 2014: Synthesis report*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Roe, G. and M. Baker (2007). Why is climate sensitivity so unpredictable? *Science* 318, 629-632. <https://doi.org/10.1126/science.1144735>
- Scafetta, N. (2021). Testing the CMIP6 GCM simulations versus surface temperature records from 1980–1990 to 2011–2021: High ECS is not supported. *Climate*, 9(11), 161. <https://doi.org/10.3390/cli9110161>
- Schwartz, S. E., R. J. Charlson, H. Rodhe (2007). Quantifying climate change—Too rosy a picture? *Nature Climate Change* 1, 23–24, <https://doi.org/10.1038/climate.2007.22>
- Seager, R., Cane, M., Ting, M., Naik, N., Clement, A., DiNezio, P., & Lee, D. E. (2019). Strengthening tropical Pacific zonal sea surface temperature gradient consistent with rising greenhouse gases. *Nature Climate Change*, 9(7), 517–522. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0505-x>
- Sherwood, S. C., & Forest, C. E. (2024). Opinion: Can uncertainty in climate sensitivity be narrowed further? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(5), 2679–2686. <https://doi.org/10.5194/acp-24-2679-2024>
- Sherwood, S. C., Bony, S., Boucher, O., Bretherton, C. S., Forster, P. M., Gregory, J. M., & Stevens, B. (2020). An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence. *Reviews of Geophysics*, 58(4). <https://doi.org/10.1029/2019rg000678>
- Soden, B. J., and I.M. Held (2006). An assessment of climate feedbacks in coupled ocean–atmosphere models. *Journal of Climate*, 19(14), 3354–3360. <https://doi.org/10.1175/jcli3799.1>
- Zelinka, M. D., Myers, T. A., McCoy, D. T., Po-Chedley, S., Caldwell, P. M., Ceppi, P., Klein, S. A., & Taylor, K. E. (2020). Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models. *Geophysical Research Letters*, 47, e2019GL085782. <https://doi.org/10.1029/2019GL085782>

5 ELTÉRÉS A MODELLEK ÉS A MŰSZERES MEGFIGYELÉSEK KÖZÖTT

Fejezet-összefoglaló

A klímamodellek elmúlt évtizedekre visszamenő alkalmazása számos vonatkozásban felmelegedési torzítást mutat. A kényszertényezők becsült változásaira túl nagy földfelszíni felmelegedés adódik (a legalacsonyabb ECS klímaértékű modellek kivételével), a modellben túl nagy a felmelegedés az alsó és a középső troposzférában, valamint felfelé túl nagy az erősítés.

A klímamodellek az amerikai kukoricaövben túl nagy közelmúltbeli sztratoszférikus lehűlést, érvénytelen félgömbi albedó értékeket, túl nagy hőveszteséget és túl nagy felmelegedést is mutatnak. Az IPCC elismerte ezen problémák némelyikét, de nem mindegyiket.

5.1 Bevezetés

Az antropogén üvegházgázok légköri szintjének emelkedésére bekövetkező jövőbeli klímaváltozások előrejelzésének elsődleges eszközei a klímamodellek. Annak felméréséhez, hogy a klímamodellek alkalmasak-e erre a célra, ésszerű feltenni azt a kérdést, hogy a modellek mennyire jól adják vissza a jelenlegi éghajlatot és annak változásait az elmúlt évszázad folyamán. Az „Éghajlatmodellezés” című keretes rész részletesen ismerteti a klímamodellek működését.

Kiemelt aggodalomra ad okot az a tény, hogy miután több évtizeden át, körülbelül három tucat modellel dolgoztak a világ kutatóközpontjai, a légköri CO₂ hipotetikus megduplázódására adott válaszként bekövetkező jövőbeli felmelegedés modellezett mértékeiben egymáshoz képest több mint háromszoros szorzótényezők is vannak, amint azt az előző fejezetben tárgyaltuk. A modellek közötti eltérések e tartománya évtizedek óta nem csökkent.

A klímamodellek nemcsak a jövővel kapcsolatos nézeteltéréseik miatt problémásak, hanem abban a tekintetben is, hogy képesek-e a közelmúltbeli eseményeket jól visszaadni. E fejezetben áttekintjük a klímamodellek pontosságának néhány legfontosabb mérőszámát: a történelmi felszíni, a troposzférabeli és a sztratoszférabeli hőmérsékleti trendek reprodukálási képességét; a vertikális felmelegedési profil reprodukálási képességét; és más éghajlati jellemzők, például a havazás reprodukálásnak képességét. Mindegyik esetre érvényes az a megállapítás, hogy a becsült múltbeli kényszertényezőkre adott válaszként a modellátlagok a túl nagy felmelegedés felé tévednek el.

TUDÁSDOBOZ: Klímamodellezés

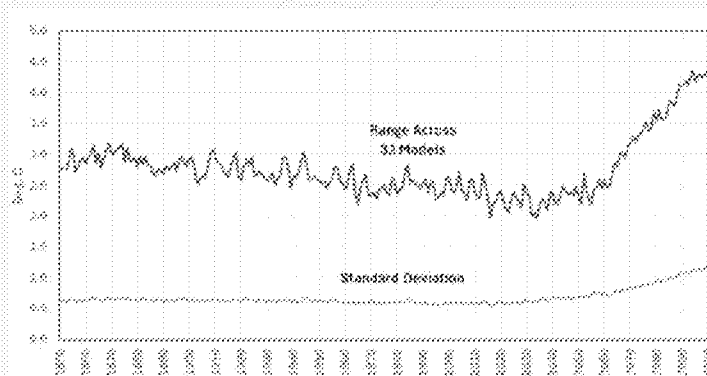
Az összes klímamodell (a legegyszerűbb kivételével) a Föld szárazföldi felszínét egy körülbelül 100 km-es négyzetrács segítségével ábrázolja. A légkör szimulálásához e négyzetek felett jellemzően 30, esetleg annál több rácsdobozt helyeznek el. Az óceánt hasonló, de finomabb ráccsal modellezzik. A légkört és az óceánokat több tízmillió rácsdobozra osztják fel.

A fizikai törvényeken alapuló számítógépes modellek kiszámítják, hogyan mozog a levegő, a víz és az energia a rácsdobozok között az idő múlásával. Az időlépés akár 10 perc is lehet, és ennek a folyamatnak több milliónyi ismétlése lehetővé teszi az éghajlat évszázadokon át tartó szimulációját. Ezeknek a modelleknek a lefuttatása még a legerősebb szuperszámítógépeken is hónapokig eltarthat. A szimulációs eredmények összehasonlítása a történelmi éghajlati adatokkal segít felmérni a modell pontosságát, míg a jövőbe mutató előrejelzéssel becslést adnak a feltételezett emberi és természeti hatásokra bekövetkező éghajlatváltozásra.

Annak ellenére, hogy egyszerűnek hangzik, az éghajlatmodellezés rendkívül összetett. Számos kritikus folyamat a rácsméretnél kisebb léptékben zajlik. Például a napfény és a hő áramlása a légkörben erősen függ a felhőzettől. Mivel az egyes felhők nyomon követése nem járható út, a kutatóknak „alrácsos” feltételezéseket kell tenniük a felhők eloszlásáról az egyes rácsdobozokban. A hó- és jégtakaró, ami azt befolyásolja, hogy mennyi napfény verődik vissza vagy nyelődik el a felszínen, egy másik alrácsos feltételezést jelent.

Minden egyes alrácsos feltételezéshez numerikus paraméterekre van szükség, amelyeket gondosan be kell állítani. A modellezők kezdetben a fizika és a megfigyelt éghajlati minták alapján becsülik meg ezeket a paramétereket, majd lefuttatják a modellt. Mivel a kezdeti eredmények gyakran jelentősen eltérnek a valós megfigyelésektől, ezeket a paramétereket „hangolják”, hogy a megfigyelt éghajlati jellemzőkhöz jobban illeszkedjenek. A különböző modellezőcsoportok eltérő feltételezéseket és hangolási stratégiákat alkalmaznak, és ez vezet eltérő eredményekre. A hangolás a klímamodellezés szükséges, de kényes oldala, mint minden összetett rendszer esetében. A rossz hangolás pontatlan szimulációkhoz vezethet, míg a túlzott hangolás azzal a kockázattal jár, hogy az eredményeket mesterségesen tereli előre meghatározott következtetések felé.

A jelenlegi éghajlat modellreprezentációinak skálája nagyon széles. Az egyik legalapvetőbb mutató – a Föld átlagos felszíni hőmérséklete – körülbelül 3°C-kal változik a CMIP6 modellekben 1880 előtt (5.1. ábra), majd 2040-ig kissé szűkül, ezután több mint 4°C-ra divergál. Összehasonlításképpen: a 20. századi felmelegedés csak körülbelül 1,0°C volt. Ez az eltérés arra utal, hogy a modellek fizikai folyamatai között jelentős különbségek vannak.



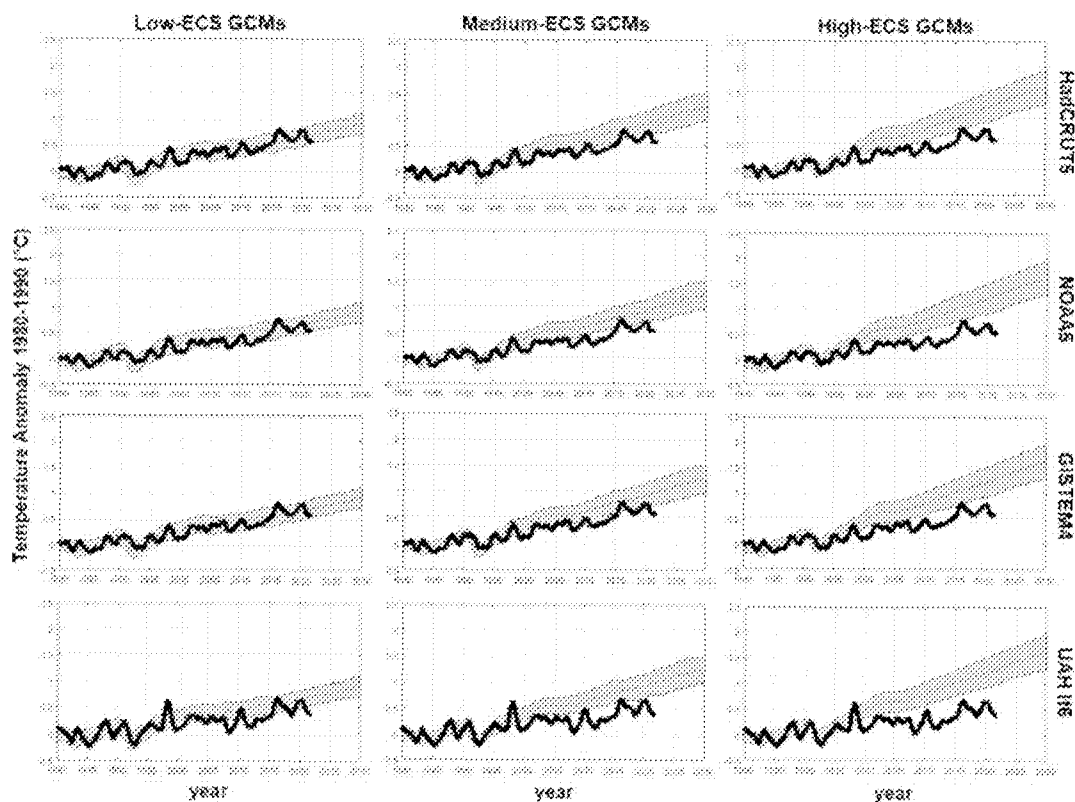
5.1. ábra: CMIP6 Átlagos felszíni hőmérséklet tartománya 33 modellben és szórás az SSP5-85 forgatókönyv alapján. Adatok a KNMI Climate Explorer weboldaláról: <https://climexp.knmi.nl/start.cgi>

A modellek azon képességén túl, hogy leírják a mai éghajlat jellemzőit, a társadalom számára kritikus kérdés az, hogy mennyire jól jelzik előre a nehezen megfogható emberi hatásokra (például az üvegházgáz-kibocsátásra, az aeroszol általi hűtésre és a földhasználat változásaira) adott válaszokat. A legfontosabb szempont, amelyet a modelleknek helyesen kell rögzíteniük, a „visszacsatolások”. Ezek akkor fordulnak elő, amikor az éghajlatváltozás vagy felerősíti, vagy elnyomja a további felmelegedést. Általánosságban elmondható, hogy az összes visszacsatolás modellezett nettó hatása a CO₂ közvetlen felmelegedési hatását megduplázza, sőt megháromszorozza.

5.2 Felszíni felmelegedés

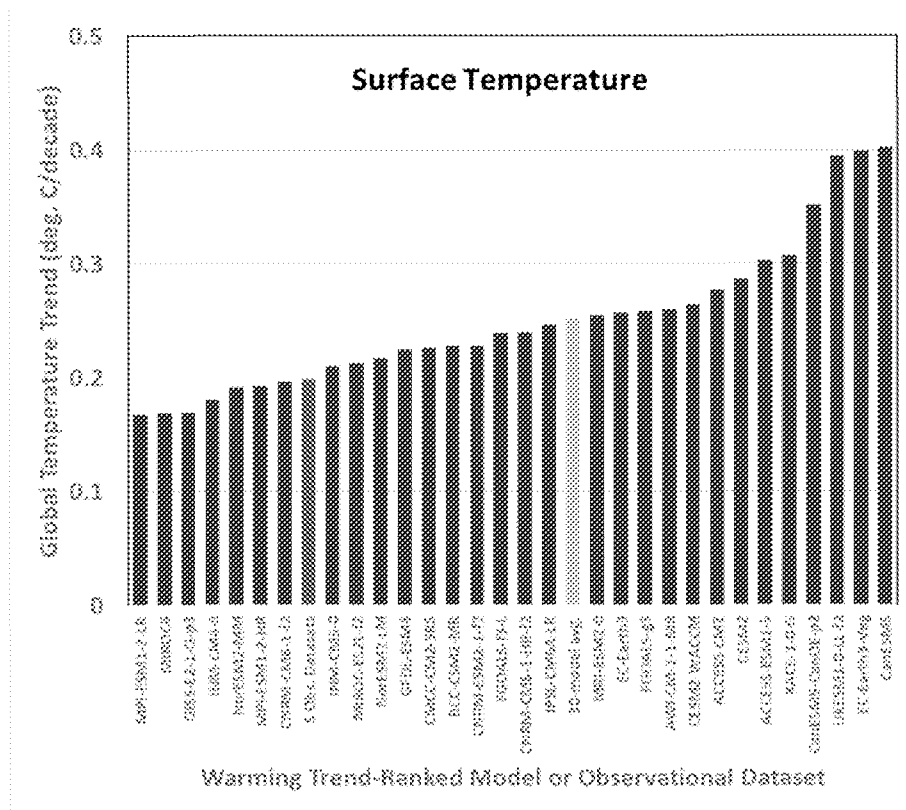
Egy klímamodell érvényességének egyszerű tesztje az, hogy képes-e reprodukálni a történelmi felmelegedést az olyan ismert múltbeli éghajlati tényezők változásaira adott válaszként, mint az üvegházgázok. Az 5.2. ábra Scafetta (2023) munkájából származik, amely a legújabb generációs (CMIP6) klímamodelleket alacsony ECS (1,5–3,0 °C), közepes ECS (3,0–4,5 °C) és magas ECS (4,5–6,0 °C) kategóriákba csoportosítja, és összehasonlítja az 1980 utáni globális átlaghőmérsékleti szimulációs tartományait három felszíni hőmérsékleti idősor és egy műholdas alsó troposzféra hőmérsékleti adatsor tartományaival.

A bal szélső oszlop azt mutatja, hogy az alacsony ECS-modellek meglehetősen jól követik az 1980 utáni történelmi felmelegedési megfigyeléseket, a középső és a jobb oldali oszlop viszont azt mutatja, hogy a közepes és magas ECS-modellek a felmelegedést feltűnően túlbecsülik.



5.2. ábra: Modelleredmények összehasonlítása a Föld felszíni felmelegedésére vonatkozó megfigyelésekkel. Az oszlopok alacsony ECS-t (13 modell), közepes ECS-t (11 modell) és magas ECS-t (14 modell) mutató modellcsoportoknak felelnek meg, míg a sorok széles körben használt megfigyelt hőmérsékleti idősorokat mutatnak. Az első három felszíni átlagokat, a negyedik pedig az alsó troposzféra átlagát mutatja. Minden panelen a sárga szín jelöli az adott csoportra vonatkozó klímamodell-szimulációk átlagát és tartományát ($\pm$ egy szórás). A vastag fekete vonal a jelzett rekordban megfigyelt éves átlaghőmérsékletet ábrázolja. Forrás: Scafetta (2023) 2. ábra.

Spencer (2024) ugyancsak hasznos összefoglalást adott a modellek és a megfigyelések közötti eltérésekről: összehasonlította a felszínhőmérsékleti adatsor trendjét az egyes klímamodellekben szereplő trenddel, amint azt az 5.3. ábra foglalja össze; a legtöbb klímamodell az 1979 óta végzett megfigyeléseknél lényegesen nagyobb felmelegedést mutat.



5.3. ábra: Globális felszíni levegőhőmérsékleti trendek (°C/évtized), 1979-2024, különböző CMIP6 klímamodellekből (piros; 30 modell átlaga: narancssárga); valamint késsel jelölt három hőmérsékleti adatsor (HadCRUT5, NOAA Global Temp és Berkeley 1 deg.) és két újrafeldolgozási adatsor (ERA5 és NCEP/NCAR R1) átlaga. Adatforrás: <https://climexp.knmi.nl/start.cgi>.

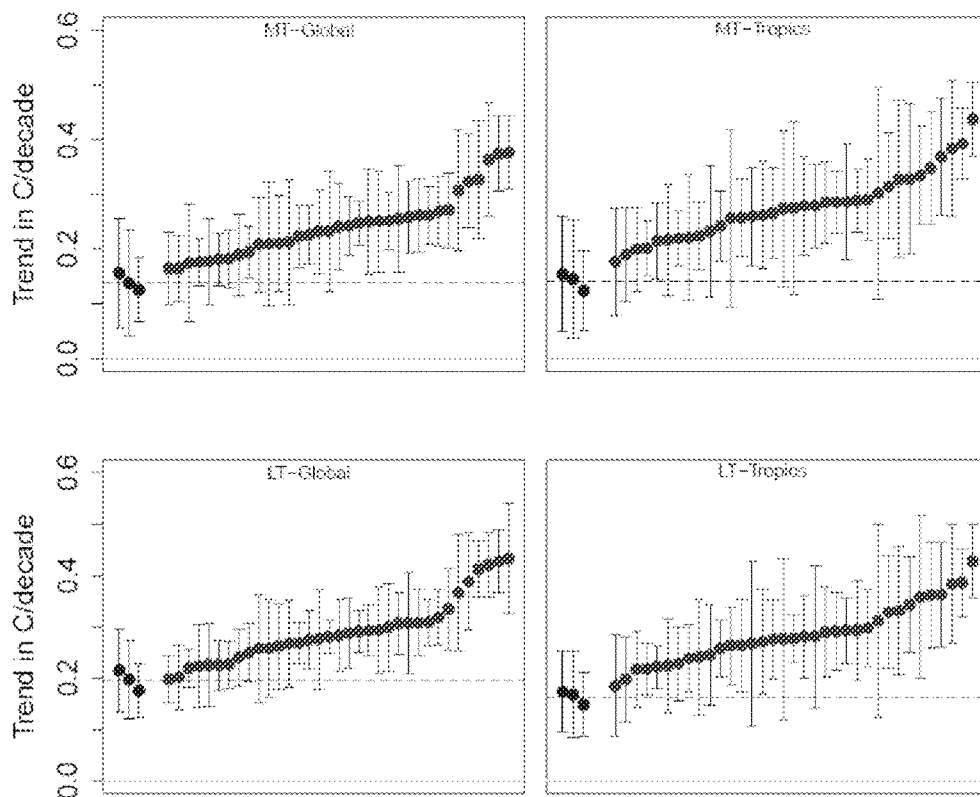
5.3 Troposzférai melegezés

Régóta ismert, hogy az éghajlati modellek átlaga túlbecsüli a trópusi troposzférában bekövetkező felmelegedést. E régió fontos tesztje az éghajlati modelleknek, mivel itt jelenik meg először és a legerősebben az antropogén üvegházhatású felmelegedés jele. A troposzféra-trendekben mutatkozó torzítások a hőátadási folyamatokban meglévő olyan modellhibákat jeleznek, amelyek a felszíni felmelegedési torzításokra is átragadnak.

Az eltérést az első amerikai klímaváltozási tudományos programjelentésben (Karl et al. 2006) súlyos következtetlenségként jelölték meg, és azóta minden IPCC-jelentésben megemlítették, de az eltérés az idő múlásával egyre súlyosbodott, és az eltérés ma már globális. McKittrick és Christy (2020) összehasonlították a CMIP6 klímamodellekben megfigyelt troposzféra-felmelegedési trendeket a műholdakról, meteorológiai léggömbökből és újrafeldolgozási rendszerekből megfigyelt trendekkel. Az 1979-2014 közötti átlagos megfigyelt felmelegedési trendet mindegyik modell túlbecsülte mind az alsó, mind a középső troposzféra rétegeiben, mind globálisan, mind a trópusokon. A legtöbb egyedi modellben az eltérés statisztikailag szignifikáns volt, és a modellek átlagában is nagyon szignifikáns.

Az 5.4. ábra a 2024-ig frissített adatokkal való összehasonlítást mutatja be (McKittrick és Christy 2025). Az utóbbi meleg évek kissé felfelé mozdították a megfigyelt trendet, és kiszécsítették a trend konfidencia intervallumait, de az általános minta ugyanaz marad: a modell túl nagy felmelegedés felé tér el, a legtöbb esetben a különbség statisztikailag szignifikáns, és az átlagos eltérés statisztikailag nagyon szignifikáns. McKittrick és Christy (2020) azt is kimutatták, hogy az eltérés

nagyobb a magas ECS-értékű modellekben, de még az alacsonyabb átlagos ECS-értékű modellek is túl nagy felmelegedést jósolnak. Ha a jövőbeli klímamodellek realisztikusan ábrázolnák a globális troposzféra- felmelegedést, valószínűleg kevésbé lennének érzékenyek, mint a CMIP6 modellegyüttes alacsony ECS-értékű tagjai.



5.4. ábra: A megfigyelt és a CMIP6 modellezett felmelegedési trendek ($^{\circ}\text{C}/\text{évtized}$, 1979-2024) a globális és trópusi alsó (LT) és középső troposzférában (MT), McKittrick és Christy (2020) módszertanát alkalmazva, 2014 és 2024 közötti adatokkal frissítve. Kék pontok: felmelegedési trendek 95 százalékos konfidenciaintervallummal 3 adattermék (rádiószondák, újrakeletkezés és műholdak) esetében. Kék szaggatott vonal: a felmelegedési trend átlaga 3 megfigyelt sorozat esetében. Piros pontok: modellezett felmelegedési trendek 95 százalékos konfidenciaintervallummal 35 modellben, a legalacsonyabbtól a legmagasabbig rendezve.

Amint azt korábban említettük, az IPCC régóta elismeri a modellek és a megfigyelések közötti eltérést. Például az AR6 443-444. oldala a trópusi troposzféráról ezt állítja (a globális összehasonlítással nem foglalkozik):

Az AR5 óta számos tanulmány továbbra is ellentmondást mutatott ki a szimulált és a megfigyelt hőmérsékleti trendek között a trópusi troposzférában, a modellek nagyobb mértékű felmelegedést szimuláltak, mint megfigyelések (Mitchell et al., 2013, 2020; Santer et al., 2017a, b; McKittrick és Christy, 2018; Po-Chedley et al., 2021)... Az 1979–2014 közötti időszakban a modellek jobban összhangban vannak az alsó troposzférában végzett megfigyelésekkel, és a legkevésbé a felső troposzférában, 200 hPa körül, ahol az eltérések meghaladják az évtizedenkénti $0,1^{\circ}\text{C}$ -ot. Számos, CMIP6 modelleket használó tanulmány arra utal, hogy az éghajlati érzékenységbeli különbségek fontos tényezők lehetnek a szimulált és a megfigyelt troposzférikus hőmérsékleti trendek közötti eltérésben (McKittrick és Christy, 2020; Po-Chedley et al., 2021), bár nehéz dekonvolúciózni az éghajlati érzékenység, az aeroszol-kényszer változásainak és a belső

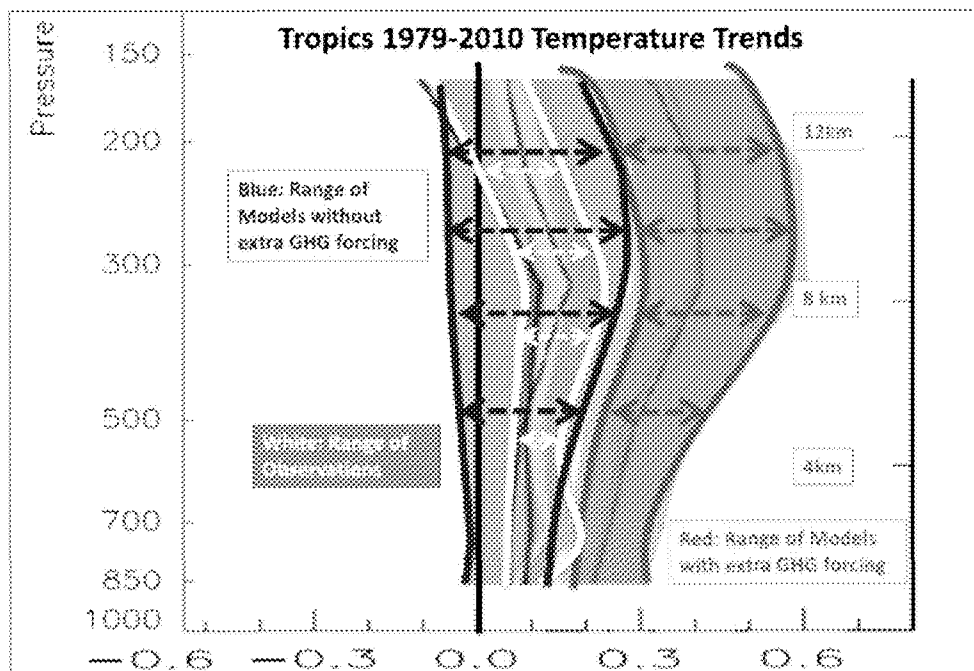
változékonyságnak a troposzférikus felmelegedési eltérésekhez való hozzájárulását (Po-Chedley et al., 2021). Egy másik tanulmány megállapította, hogy egy feltételezett negatív trópusi felhő-visszacsatolás hiánya az egyik modellben a felső troposzféra felmelegedési eltéréseinek felét magyarázhatja (Mauritsen és Stevens, 2015).

... Összefoglalva, a tanulmányok továbbra is úgy találják, hogy a CMIP5 és CMIP6 modellszimulációk erősebben melegsznek, mint ahogy azt a trópusi közép- és felső troposzférában az 1979–2014 közötti időszakban végzett megfigyelések mutatják (Mitchell et al., 2013, 2020; Santer et al., 2017a, b; Suárez-Gutiérrez et al., 2017; McKittrick és Christy, 2018), és hogy részben a túlbecsült felszíni felmelegedés felelős (Mitchell et al., 2013; Po-Chedley et al., 2021). Ezért *közepes megbízhatósággal* értékeljük úgy, hogy a CMIP5 és CMIP6 modellek a felső trópusi troposzférában megfigyelt felmelegedést az 1979–2014 közötti időszakban továbbra is legalább 0,1°C-kal túlbecsülik.

Figyelemre méltó, hogy a túlzott modellfelmelegedésre utaló bizonyítékok felhalmozódása ellenére az IPCC a felmelegedési torzítás létezését csak *közepes megbízhatóságúnak* tekinti.

5.4 Eltérések a függőleges hőmérsékleti profil mentén

Egy másik fontos eltérés jelent a modellek és a megfigyelések között a klímamodellekben található magassággal való túlzott erősítés. Az összehasonlítás az AR5 10. fejezetében szerepelt, bár csak az online kiegészítésben (10.SM.1. ábra), és csak egy olyan ábrán, amelynek formázása elfedte a lényegét. A 10.SM.1. ábrára sem a fő IPCC-jelentésben, sem az összefoglalóban nem hivatkoznak, így az olvasók nem vehették észre. Bár első pillantásra nem nyilvánvaló, azt mutatja, hogy az alsó troposzférában az 1979-2010 közötti felmelegedés olyan kicsi, hogy összhangban van azzal, hogy nincs üvegházgáz-kényszer, és nem egyezik azokkal a modellfuttatásokkal, amelyek üvegházgáz-kényszert feltételeznek. Az 5.6. ábrán átdolgoztuk az IPCC AR5 10.SM.1. ábráját, hogy kiemeljük ezt a kritikus pontot.

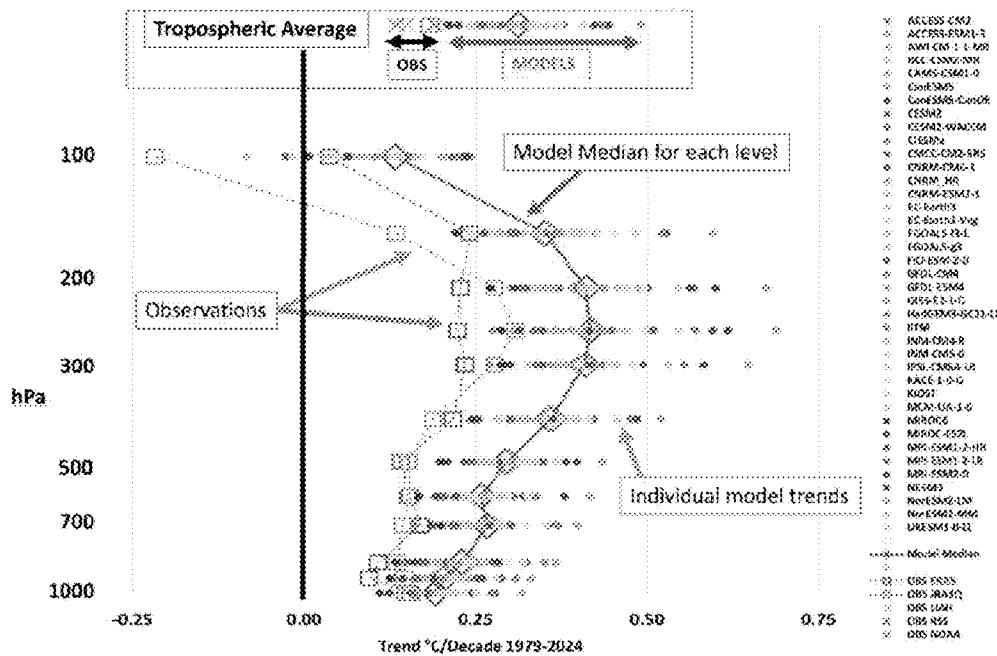


5.5. ábra: Függőleges melegedési mintázat a trópuson (a déli szélesség 20° és az északi szélesség 20° között). Vízszintes tengely: °C/évtized. Forrás: Az IPCC AR5 annotált verziójának 10.SM.1 ábrája

Az 5.5. ábra összehasonlítja a modell és a megfigyelés hőmérsékleti trendjeit a déli földrajzi szélesség 20° és az északi szélesség 20° között (a trópusi övezetben), a magasság függvényében. Ebben a régióban, ahol a modellek szerint a felmelegedésnek a legerősebbnek kellene lennie, a megfigyelések (itt fehér színnel jelölve) a kék „Nincs CO₂” sávon belül, és teljes mértékben a „CO₂-vel” piros burkológörbén kívül esnek. Ez azt jelenti, hogy a teljes trópusi légköri oszlopban, a felszíntől a sztratoszféra aljáig, a megfigyelt felmelegedési trendek olyan kicsik, hogy összhangban vannak az antropogén CO₂-t nem tartalmazó modellek kimenetével, és kívül esnek a megnövekedett CO₂-tartalommal kényszerített modellek által generált felmelegedési trendek teljes burkológörbében.

Hasonló összehasonlítást végzett Christy és McNider (2017), aminek frissített változatát (1979-2024) az 5.6. ábra mutatja be. A modellezett hőmérsékleti trendek meghaladják a felszíntől a troposzféra tetejéig tartó megfigyeléseket, a megfigyelt trendek a legtöbb nyomásszinten a teljes modelltartomány alatt vannak. Az 5.6. ábrán látható a három műholdas adatkészlet (NOAA, UAH és RSS) trópusi troposzférikus hőmérsékleti (TTT) átlaga is, összehasonlítva az 1979-2024 közötti éghajlati modellek ugyanazon rétegének átlagával. A megfigyelt trendek ismét teljesen a modelltartomány alatt helyezkednek el.

A modellezők által a modellekben zajló fizikai folyamatok jellemzésére hozott döntések széles skáláját (lásd a fenti 5.1. szakaszban a Klíma-modellezés című keretes írást) a középső troposzféra megfigyelhető trendek nagy szórása mutatja, ami medián ± 40 százaléka (5.6. ábra). Ez élénken illusztrálja a bizonytalanságokat a turbulenciát, a nedvességgel kapcsolatos termodinamikát és az energiafluxusokat magában foglaló komplex rendszer modellezésére (paraméterezésére) tett kísérletekben a trópusi légkör idő- és térléptékeinek teljes tartományában.



5.6. ábra: Modellezett és megfigyelt melegedés trópusi troposzférában. Forrás: a 2024-es adatokkal is frissített Christy és McNider (2017). Zöld és kék vonalak: újrafeldolgozott megfigyelési idősorok.

Ez az eltérés sok vitát váltott ki, egyesek azzal érvelnek, hogy még ha a trópusokon nagyon kevés felmelegedést is figyelnek meg a magasban, akkor is létezik egy „forró pont” abban az értelemben, hogy a magasban a felmelegedés nagyobb, mint a felszínen (Santer et al. 2008). De erős bizonyítékok léteznek arra, hogy a modellek az erősítési rátát is eltúlozzák. Klotzbach et al. (2009) kimutatták, hogy a modellek nagyobb erősítést vetítenek előre a magasság függvényében, mint amennyit megfigyelnek. Ezt az eredményt később részletes idősoros elemzéssel (Vogelsang és Nawaz 2016) is megerősítették: kimutatták, hogy a modell és a megfigyelések közötti különbség statisztikailag szignifikáns.

A légkör hőmérsékleti profilja esetében a modellek nemcsak bizonytalanok, hanem a megfigyelésekhez képest közös felmelegedési torzítást is mutatnak. Ez bizonyos alapvető visszacsatolási folyamatokat téves felfogására utal.

Az IPCC AR6 ezt a kérdést nem vizsgálta.

5.5 Sztratoszférikus hűlés

Az antropogén klímaváltozás várható általános „ujjlenyomatának” fontos eleme a troposzféra felmelegedésének és a sztratoszféra lehűlésének egyidejű folyamata. Ez utóbbi jellemzőt az ózonréteg csökkenése és helyreállása is befolyásolja. Az AR6 elismerte, hogy lehűlést csak 2000-ig figyeltek meg. Azóta a sztratoszféra némi felmelegedést mutat, ellentétben a modell-előrejelzésekkel.

Az AR6 WG1 2. fejezet 327-9. oldala kimondja:

A teljes alsó sztratoszférában (körülbelül 10–25 km) az átlaghőmérséklet 1980 és 2019 között az összes adatot illetően csökkent, a csökkenés nagy része 2000 előtt történt. A csökkenés akkor is fennáll, ha eltávolítjuk az El Chichon (1982) és a Pinatubo (1991) vulkánkitörések trendre gyakorolt hatását, amelyről Steiner et al. (2020a) megállapították, hogy az 1979–2018 közötti lehűlési trendet évtizedenként 0,06°C-kal növelte. A 2000–2019 közötti időszakban a legtöbb

adathalmaz nem mutat jelentős trendet, még csak csak marginálisan jelentős trendet sem. Philipona et al. (2018) eredményei pedig gyenge növekedést mutatnak a 2000–2015 közötti időszakban a rádiószondákkal mintavételezett legalsó sztratoszférában....

Gyakorlatilag biztos, hogy az alsó sztratoszféra a 20. század közepe óta lehűlt. A legtöbb adathalmaz azonban azt mutatja, hogy az alsó sztratoszféra hőmérséklete az 1990-es évek közepe óta stabilizálódott, és az elmúlt 20 évben nem történt jelentős változás. Valószínű, hogy a középső és felső sztratoszféra hőmérséklete 1980 óta csökkent, de a nagyságrendet illetően alacsony a megbízhatóság.

A hivatkozott forrás, Philipona et al. (2018) a „Rádiószondák azt mutatják, hogy évtizedekig tartó lehűlés után az alsó sztratoszféra most melegszik” című cikkében kijelentette:

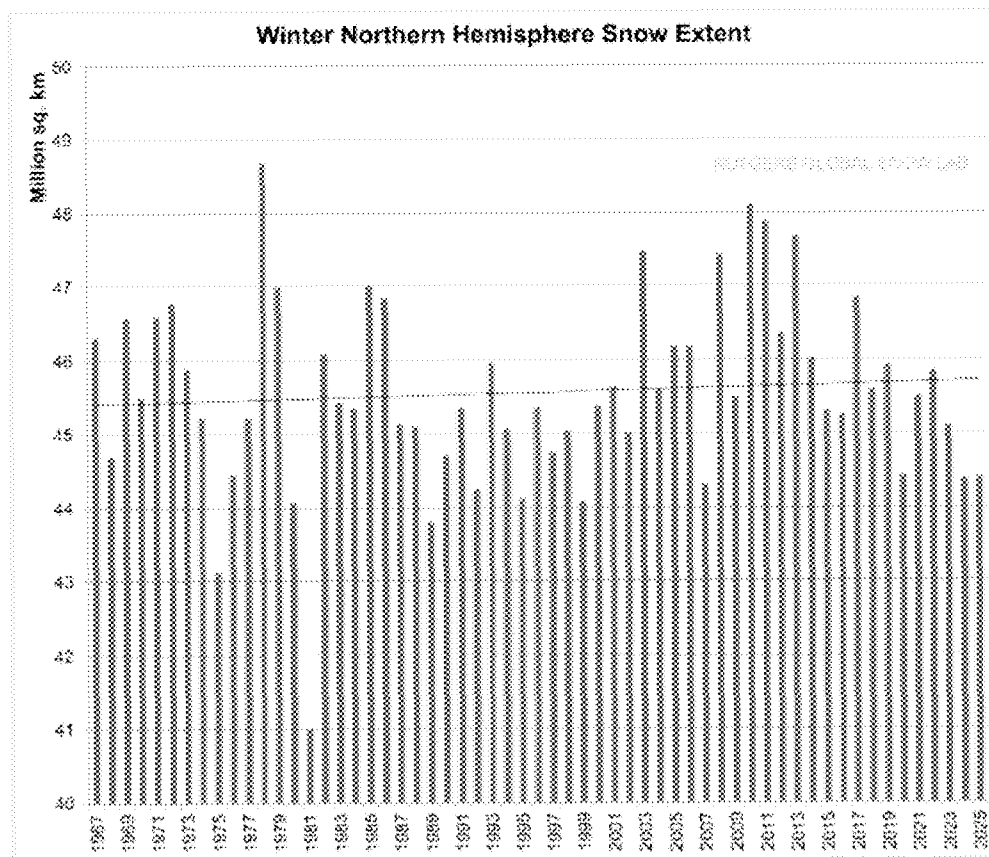
Az üvegházgázok folyamatos növekedésére és a sztratoszféra ózonrétegének elvékonyodására válaszul a klíamodellek az elkövetkező évtizedekben a troposzféra folyamatos felmelegedését és a sztratoszféra lehűlését vetítik előre. Az alsó sztratoszféra hőmérsékletének globális átlagos műholdas megfigyelése a századforduló óta nem mutat jelentős trendet. Ezzel szemben 60 állomás vertikálisan felbontott rádiószondás méréseinek elemzése az alsó sztratoszféra hőmérsékletének emelkedését mutatja a századforduló óta 15 és 30 km közötti magasságban és a legtöbb kontinensen. A trendbecslés némileg érzékeny a homogenitásértékelési döntésekre, de az alsó sztratoszférában az összes vizsgált rádiószondás adatkészlet a 20. század végi lehűlésről a 21. század eleji felmelegedésre való változást sugallja.

Santer et al. (2023) frissített adatokat is felhasznál annak kimutatására, hogy az alsó sztratoszférában a lehűlési trend nem jelent meg újra.

A troposzférikus felmelegedés és a sztratoszférikus lehűlés kombinációja az antropogén klímaváltozás gyakran emlegetett „ujjlenyomata”. A sztratoszféra-felmelegedés 2000 óta egybeesik a folyamatos felszíni és troposzférikus felmelegedéssel, efféle mintázat a klíamodell-szimulációkban nincs, és nyilvánvalóan nem egyeztethető össze az antropogén ujjlenyomattal.

5.6 Eltérések a hótakaróban

A Rutgers Egyetem Hólaboratóriuma által összeállított adatok szerint az északi félteke téli hótakarója nem csökken (5.7. ábra); sőt, inkább emelkedő tendenciát mutat.



5.7. ábra: Az északi félteke téli hótakarójának kiterjedése. Forrás: https://climate.rutgers.edu/snowcover/chart_seasonal.php?ui_set=nhland&ui_season=1 (hozzáférés: 2025. május 27.)

A modellek mégis az északi félteke hótakarójának csökkenését vetítik előre egy melegedő éghajlaton, ahogyan azt Connolly et al. (2019) is leírták.

A klímamodellek rosszul magyarázták a megfigyelt trendeket [az északi félteke hótakarójában]. Míg a modellek azt sugallják, hogy a hótakarónak mind a négy évszakban folyamatosan kellett volna csökkennie, csak a tavasz és a nyár mutatott hosszú távú csökkenést, és a megfigyelt csökkenések mintázata ezekben az évszakokban meglehetősen eltért a modellezett előrejelzésektől. Ezenkívül az őszi és téli megfigyelési trendek hosszú távú növekedésre utalnak, bár e trendek statisztikailag nem szignifikánsak.

Az AR6 nagyrészt a tavaszi szezonra korlátozza az északi félteke hótakarójának kiterjedésével (SCE) kapcsolatos tárgyalását, amelyre vonatkozóan a modellek és a megfigyelések csökkenő tendenciát mutatnak. A téli változásokról a következő megjegyzést teszi (AR6 WGI 2. fejezet, 344. o.):

Az északi féltekén (az NH-ban) 1978 óta tapasztalható SCE-trend értékelése azt mutatja, hogy az októbertől februárig tartó időszakban jelentős bizonytalanság van a trendben, ahol az előjel a megfigyelési szorzattól függ. A NOAA Éghajlati Adatrekordját használó elemzés az októbertől februárig tartó SCE növekedését mutatja (Hernández-Henriquez et

al., 2015; Kunkel et al., 2016), míg a műholdakon elhelyezett optikai érzékelőkön (Hori et al., 2017) vagy a több megfigyelésen alapuló termékeken (Mudryk et al., 2020) alapuló elemzések negatív tendenciát mutatnak minden évszakban.

Az AR6 WGI 9. fejezete (1284. o.) arra mutat rá, hogy a NOAA klímaadat-nyilvántartása, amely az őszi és téli SCE növekedését mutatja, ellentmond a szárazföldi megfigyeléseknek és a modellalapú adatkészleteknek. Megjegyzi, hogy az optikai műholdképek használata a téli SCE megállapítására kihívást jelent a felhőzet és a téli hónapokban csökkenő napsugárzás miatt. A csendes-óceáni part menti államokra (CA, OR és WA) összpontosítva a hideg évszakban a tavasszal és nyáron elolvadó hegyi havazás a meleg évszak vízkészletének jelentős részét biztosítja. A fő forrásrégiók (Kaskádok és Sierra Nevada hegység) havazásának átfogó rekonstrukciója az éves összesítésekben a 19. század vége óta nem mutat jelentős tendenciákat (Christy 2022).

Összefoglalva, a naprakész Rutgers SCE adatbázis eltérést mutat a modellek és a megfigyelések között. További munkára van szükség a megfigyelési adatkészletekben lévő ellentmondásos trendek összeegyeztetésére.

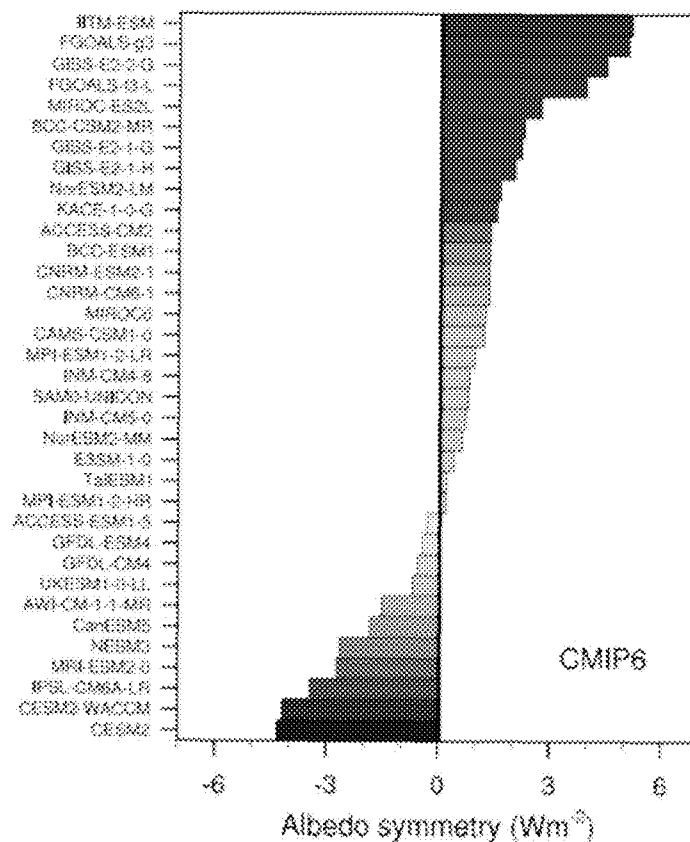
5.7 A planetáris albedó félgömbi szimmetriája

A bolygóalbedó a bejövő napsugárzásnak a Föld által az űrbe visszavert hányada. Fontos eleme a sugárzási energiaegyensúlynak, és befolyásolja, hogy a bolygó idővel felmelegszik-e vagy lehűl. A bolygóalbedót jellemzően 0,30 körüli értékre becsülik; a 0,01-es léptékű változások napenergia-kényszerben körülbelül 3 W/m²-es változásnak felelnek meg, ami nagyobb, mint a jelenlegi antropogén kényszer. Régóta megfigyelték, hogy a modellek egymásnak és a globális bolygóalbedó értékével kapcsolatos megfigyeléseknek is ellentmondanak (Stephens et al. 2015).

A földi albedó érdekes tulajdonsága, hogy az északi félteke (NH) és a déli félteke (SH) közel azonos átlagos albedóval rendelkezik, legalábbis az ötven éve folyó műholdmegfigyelés szerint (Stephens et al., 2015). E szimmetria meglepő, mert az SH-n sokkal több óceán van, mint szárazföld. Mivel az óceán kevésbé fényvisszaverő, mint a szárazföld, az NH-nak nagyobb értékű albedóval kellene rendelkeznie. A felhőzet (ami erősen fényvisszaverő) gyakoribb az északi féltekén, és a két félteke felszíni albedóegyensúlyának eltérései a felhőzet által kompenzálódik. Datseris és Stephens (2021) kimutatták, hogy e felhőkompenzáció a déli félteke trópusvidéken kívüli viharpályáiból származik, amelyek felhősebbek, mint az északi féltekén. Bár ennek a féltekei szimmetriának a mechanizmusa nem tisztázott, valószínűleg nagy időbeli és térbeli léptékekben működik.

Az albedó féltekei szimmetriája az éghajlati modellekhez egy egyszerű bruttó mérőszámot szolgáltat. Rugenstein és Hakuba (2023) ezt a mérőszámot az északi és a déli félteke éves átlagos albedói közötti különbségként definiálták, a visszavert napfény Wm⁻²-ben kifejezve, és odaszorozhatták a CMIP6 éghajlati modellekhez, ahogy az az 5.8. ábrán látható. A legtöbb CMIP6 modell nem adja vissza a megfigyelt kis aszimmetriát (kb. 0,1 Wm⁻²), sőt abban sem értenek egyet, hogy melyik félteke veri vissza jobban a fényt. Ráadásul az aszimmetria nagysága egyes modellekben akár 5 Wm⁻²-t is elérhet, ami a jelenlegi antropogén kényszernek kétszerese (körülbelül 2,7 Wm⁻²).

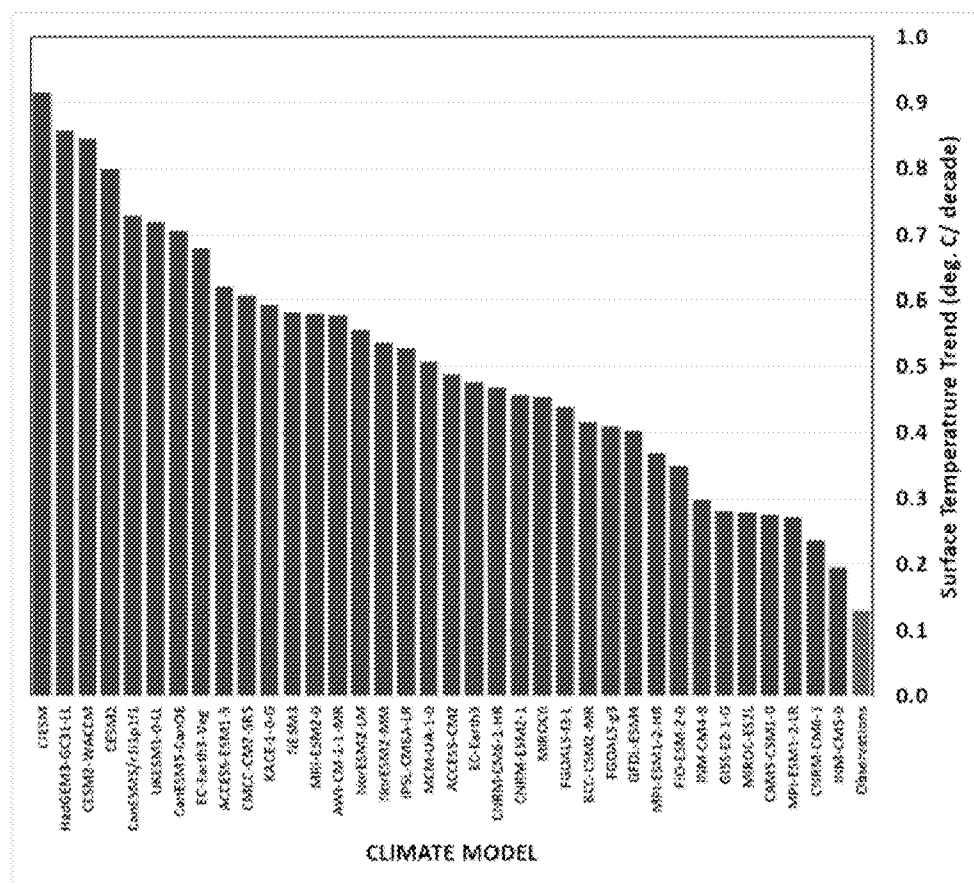
A nem fizikai albedóaszimmetriák jelentősége az éghajlati modellekben még nem teljesen ismert. Más modellvizsgálatok azonban arra utalnak, hogy az albedó féltekei közötti változásai megváltoztathatják a pólusok felé irányuló hőáramokat, a meridionális hőmérsékleti gradienseket, a viharosságot és a féltekei óceánok hőtárolási különbségeit. A modellek és a megfigyelések közötti eltérés további vfel kérdéseket vet fel a felhő-visszacsatolási folyamatokkal kapcsolatban, és így még általánosabb érvénnyel csökkenti a jövőbeli éghajlati modell-előrejelzéseinek megbízhatóságát.



5.8. ábra: A 20 éves átlagos fényvisszaverőkéesség (albedo) különbségei az északi és a déli félteke között a legutóbbi IPCC-értékelésben használt CMIP6 modellek esetében (színes oszlopok). A nagyon kis megfigyelt különbséget a függőleges fekete vonal jelzi. Rugenstein és Hakuba (2023) nyomán.

5.8 Az USA kukoricaövezete

A modellek és a megfigyelések közötti egyik legnagyobb eltérés az USA kukoricaövezetében található, ami a globális élelmiszertermelés szempontjából különösen fontos régiónak számít. Az 5.9. ábra a nyári (június, július, augusztus) felmelegedési trendeket mutatja a 12 államból álló kukoricaövezetben (IN, IA, IL, ND, SD, MO, MN, WI, MI, OH, KS, NE) 1973 és 2022 között. A megfigyelésekhez (kék) képest mind a 36 klímamodell (piros) túl gyors melegedést mutat.



5.9. ábra: Modellezett és megfigyelt felmelegedési trendek az USA kukoricaövezetében, 1973 és 2022 között.

Amint azt a 9. fejezetben tárgyaltuk, az emelkedő hőmérsékletnek az USA kukorica hozamára gyakorolt várható negatív hatásai mindmáig nem valósultak meg, ellentétben azokkal a széles körben nyilvánosságra hozott tanulmányokkal, amelyek azt állítják, hogy az elméleti jövőbeli hatások máris térzékelhetők (pl. Seager et al., 2018).

Az IPCC elismeri a regionális klímamodell-eredmények pontossági korlátait. Ez a példa azt mutatja, hogy a felhasználóknak a modell-előrejelzéseket esetleg kell gondosan értékelniük, mivel a helyi torzítások elég nagyok lehetnek ahhoz, hogy a modellek egyszerűen nem felelnek meg a célnak. Ahogy azt a modellező közösség két vezetője nemrégiben megjegyezte (kiemelés tőlem)

... úgy véljük, hogy számos olyan kulcsfontosságú alkalmazás esetében, amely regionális klímamodell-kimenetet igényel, vagy a kis léptékű folyamatokból adódó nagyléptékű változások megítélésében **a modellek jelenlegi generációja e célnak nem felel meg.** (Palmer és Stevens 2019)

Összefoglalva:

- A klímamodellek az elmúlt néhány évtized számos reprodukálási vonatkozásában felmelegedési torzításokat mutatnak.

- Túl nagy felmelegedést mutatnak a felszínen (kivéve a legalacsonyabb ECS-értékű modelleket), túl nagy felmelegedést az alsó és középső troposzférában, valamint túl nagy felerősödést a magasban
- Túl nagy sztratoszférikus lehűlést, túl sok hővesztiséget és túl nagy felmelegedést mutatnak az Egyesült Államok kukoricaövezetében.
- Az egyes klímamodellek féltekei albedókülönbsége a megfigyelésekhez képest az előjelet és a nagyságrendet illetően is széles skálán mozog. A W/m^2 -ben kifejezett tartomány háromszor nagyobb a CO_2 által jelentett közvetlen antropogén kényszernek.
- Az IPCC elismert néhány efféle problémát, de nem mindegyiket.

Hivatkozások

- Christy, J. R., R. T. McNider (2017). Satellite bulk tropospheric temperatures as a metric for climate sensitivity. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 53, 511-518.
<https://doi.org/10.1007/s13143-017-0070-z>
- Christy, J. R. (2022). Time series construction of Oregon and Washington snowfall since 1890 and an update of California snowfall through 2020. *Journal of Hydrometeorology* 23, 1845-1860.
<https://doi.org/10.1175/JHM-D-21-0178.1>
- Connolly, R., M. Connolly, W. Soon, et al. (2019). Northern Hemisphere snow-cover trends (1967–2018): A comparison between climate models and observations. *Geosciences* 9, 135.
<https://doi.org/10.3390/geosciences9030135>
- Datseris, G., B. Stevens (2021). Earth's albedo and its symmetry. *AGU Advances* 2, e2021AV000440.
<https://doi.org/10.1029/2021AV000440>
- Karl, T.R., S. J. Hassol, C. D. Miller, W. L. Murray, eds. (2006). *Temperature Trends in the Lower Atmosphere: Steps for Understanding and Reconciling Differences*. U.S. Climate Change Science Program/Subcommittee on Global Change Research.
https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc12017/m2/1/high_res_d/sap1-1-final-all.pdf
- Klotzbach, P.J., R. A. Pielke, Sr., R. A. Pielke, Jr., J. R. Christy, R. T. McNider (2009). An alternative explanation for differential temperature trends at the surface and in the lower troposphere. *Journal of Geophysical Research — Atmospheres* 114(D21).
<https://doi.org/10.1029/2009JD011841>
- McKittrick, R. and J. R. Christy (2020). Pervasive warming bias in CMIP6 tropospheric layers. *Earth and Space Science* 7. <https://doi.org/10.1029/2020EA001281>
- McKittrick, R., and J.R. Christy (2025), “Data and Code for DoE Report 2025”, Mendeley Data, V1, doi: 10.17632/8n9ks93vn7.1
- Palmer, T., and B. Stevens (2019). The scientific challenge of understanding and estimating climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(49), 24390–24395.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1906691116>
- Philipona, R., C. Mears, M. Fujiwara, et al. (2018). Radiosondes show that after decades of cooling, the lower stratosphere is now warming. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres* 123.
<https://doi.org/10.1029/2018JD028901>
- Rugenstein, M., and M. Hakuba (2023). Connecting hemispheric asymmetries of planetary albedo and surface temperature. *Geophysical Research Letters* 50, e2022GL101802.
<https://doi.org/10.1029/2022GL101802>

- Santer B D, P.W. Thorne, L Haimberger et al. (2008) Consistency of modelled and observed temperature trends in the tropical troposphere *International Journal of Climatology* 28 1703–22 <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.1756>
- Santer, B.D. S. Po-Chedley, L. Zhao, C et al. (2023) Exceptional stratospheric contribution to human fingerprints on atmospheric temperature, *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.* 120 (20) e2300758120, <https://doi.org/10.1073/pnas.2300758120>
- Scaffeta, N (2023) CMIP6 GCM ensemble members versus global surface temperatures. *Climate Dynamics* 60, 3091–3120 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06493-w>
- Seager, R., J. Feldman, N. Lis, et al. (2017). Whither the 100th meridian? The once and future physical and human geography of America’s arid–humid divide. Part II: The meridian moves east. *Earth Interactions* 22. <https://doi.org/10.1175/EI-D-17-0012.1>
- Spencer, R. W. (2024). Global warming: Observations vs. climate models. *Environment Backgrounder*, The Heritage Foundation. <https://www.heritage.org/environment/report/global-warming-observations-vs-climate-models>
- Stephens, G. L., D. O'Brien, P.J. Webster et al. (2015). The albedo of Earth. *Reviews of Geophysics*. <https://doi.org/10.1002/2014RG000449>
- Vogelsang, T. and N. Nawaz (2016). Estimation and inference of linear trend slope ratios with an application to global temperature data: *Journal of Time Series Analysis* 38. <https://doi.org/10.1111/jtsa.12209>

6 SZÉLSŐSÉGES IDŐJÁRÁS

Fejezet-összefoglaló

A rendelkezésre álló történelmi adatokhoz képest a szélsőséges időjárási legtöbb megnyilvánulása nem mutat statisztikailag szignifikáns, hosszú távú tendenciát. Bár az 1950-es évek óta az Egyesült Államokban több lett a forró napok száma (amint azt az AR6 hangsúlyozza), e szám az 1920-as és 1930-as évekre jellemzőkhöz képest még mindig alacsony. A konvektív (függőleges légáramlással járó) szélsőséges viharok, hurrikánok, tornádók, árvizek és aszályok jelentős természetes változékonyságot mutatnak, de hosszú távú növekedés az észlelések szerint nincsen. Egyes régiókban rövid időközönként kimutatható a szélsőséges csapadékesemények számának növekedése, de tartós és regionális trend nem alakul ki. A tűzvészek nem gyakoribbak az Egyesült Államokban, mint az 1980-as években voltak. A leégett terület nagysága az 1960-as évektől a 2000-es évek elejéig nőtt, azonban a becsült természetes alapszinthez képest még mindig kicsiny. Az Egyesült Államokbeli tűzvész-tevékenység erősen függ az erdőgazdálkodás gyakorlatától.

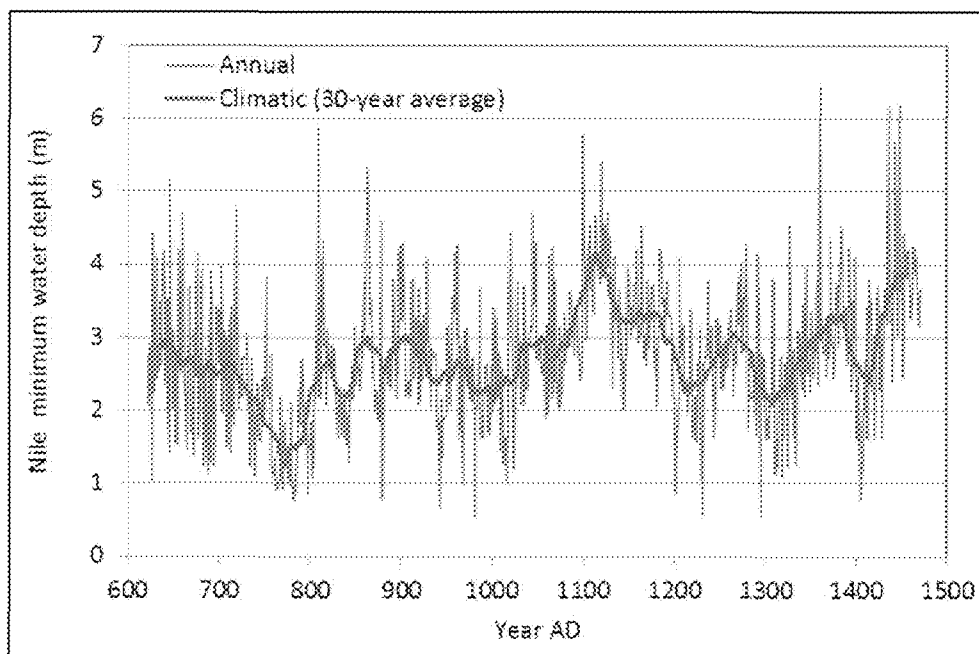
6.1 Bevezetés

A nagy hatású időjárási szélsőségek, amelyek általában a hőmérséklettel, a csapadékkal és/vagy az erős széllel kapcsolatosak, megzavarhatják az infrastruktúrát, és ezáltal veszélyeztethetik az emberi egészséget és a jólétet. A kérdés nem az, hogy bekövetkeznek-e szélsőségek. Inkább az, hogy vannak-e a szélsőségek gyakoriságában vagy jellegében hosszú távú (évtizedes léptékű) változások („észlelés”), valamint az, hogy milyen mértékben okozza ezeket a változásokat és a veszélyekben bekövetkező változásokat az antropogén üvegházgáz-kibocsátás („attribúció”; pl. AR6 Seneviratne et al. 2021).

Annak az állítására, hogy a felmelegedés súlyosbítja a szélsőséges időjárási eseményeket, az ún. folyamat alapú megértésre és egyszerű termodinamikai érvekre hivatkoztak. Naivitás azonban azt feltételezni, hogy a közelmúltbeli szélsőséges események bármelyikét az éghajlatra gyakorolt emberi hatás okozta volna. Az éghajlat az időjárás évtizedek alatti statisztikai tulajdonságairól szól, nem pedig egyszeri eseményekről. Továbbá statisztikai elemzésre csak körülbelül 130 évnnyi megbízható megfigyelési adat áll rendelkezésre. Ez a rövid időszak még nem tartalmazza az összes szélsőséges eseményt, amelyet az éghajlati rendszer önmagában képes létrehozni. A geológiai idők során az éghajlati rendszer (lényegében) végtelen sokféle időjárási mintázatot és szélsőséget generált, és mivel ezekről nem történt ember általi megfigyelés, így hiányoznak az extrém statisztikák meghatározásához használt adatbázisokból [lásd alább: *A rövid adatrekordok veszélyei*]. Emiatt egy eddig példa nélküli szélsőséges esemény hozzárendelése feltételezéseket igényel a természetes változások nagyságrendjére vonatkozólag.

Ez a fejezet az extrém időjárás trendjeinek észlelésével foglalkozik, míg a 8. fejezet az ok-okozati hozzárendelést vizsgálja, a 8.4. szakasz pedig kifejezetten a szélsőséges időjárással foglalkozik. Ha nem észlelünk trendet, akkor egyértelműen nincs alapja a hozzárendelésnek. De még ha meg is figyelhető egy trend, nem feltétlenül következik, hogy azt az ember által okozott felmelegedésnek tulajdonítható.

Különösen igaz ez a csapadékeseményekre. A hidrológiai szakirodalomban régóta tudott, hogy a csapadékadatokban hosszú ideig tartó, lassú és szabálytalan oszcillációk vannak jelen (Hurst 1951, Cohn és Lins 2005, Markonis és Koutsoyiannis 2016). A változékonyság pontos becsléséhez az efféle természetes mintázati jellemzőik hosszú megfigyelést igényelnek. A természetes változékonyság időmértékéhez képest rövid feljegyzések elemzése hajlamossá tesz a trendek félreértelmezésére, túlbecsülve a ma megmutatkozó trendek jelentőségét és alábecsülve a szélsőséges események valószínűségét (Cohn és Lins 2005)



6.1.1. ábra: A Nílus folyó éves minimummélysége Kairó közelében több mint 650 éven keresztül, Kr. u. 622-től 1284-ig. A méterben mért adatok a hosszabb távú trendek körüli évenkénti ingadozások jellegzetes mintázatát mutatják. Koutsoyiannis (2013) adatai

Jó példa erre a Nílus folyó éves minimummagasságának nyolc évszázados feljegyzése, amelyet Kairó Roda-szigetén figyeltek meg, és amely a 6.1.1. ábrán látható. A Nílus folyót egy 4 millió négyzetmérföldes vízgyűjtő medencében hulló csapadék táplálja, ami a CONUS körülbelül egyharmadának felel meg. Mivel az emberi hatás a globális éghajlatra jóval a 20. század előtt biztosan elhanyagolható volt, a harmincéves átlag évszázados léptékű változékonysága teljesen természetes eredetű; a hetedik és nyolcadik századi egyiptomiak tévesen feltételezték volna, hogy az akkoriban súlyosbodó aszály lenne az „új normális”.

Ezeket a fenntartásokat szem előtt tartva vizsgáljuk meg a kiválasztott időjárási és éghajlati szélsőségek változására vonatkozó bizonyítékokat. Visszatérő téma a közvélemény és a tudományos bizonyítékok közötti széles szakadék. A médiatudósításokban, a kormányzati és a magánszektorbeli tárgyalásokon, sőt egyes tudományos szakirodalomban is rutinná váltak az általánosító kijelentések, miszerint mindenféle szélsőséges időjárás az üvegházhatású gázok és a „klímaváltozás” miatt súlyosbodik. A szakértői értékelések azonban jellemzően nem vonnak le ilyen átfogó következtetéseket, ehelyett a konkrét trendek beazonosításában, valamint az antropogén kényszerrel való ok-okozati összefüggés megállapításában rejlő nehézségeket hangsúlyozzák.

A következő fejezetekben részleteket közlünk különféle IPCC és NCA értékelő jelentésekből, a forrásokat a következőképpen jelölve:

SREX: Az IPCC különjelentése a szélsőséges események és katasztrófák kockázatkezeléséről az éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodás előmozdítása érdekében (2012)

AR6: Az IPCC hatodik értékelő jelentése, I. munkacsoport (2021).

NCA4: Az Egyesült Államok klímatudományi különjelentése a negyedik nemzeti éghajlati értékelésről (2017), I. kötet.

NCA5: Ötödik nemzeti éghajlati értékelés (2023).

A részletekben a dőlt betűs rész az eredetiből való, a félkövér kiemelés tőlünk származik. Ezenkívül, ahol lehetséges, a 2024-ig terjedő időszakra vonatkozó információk megadásához standard kormányzati forrásokat használunk.

6.2 Hurrikánok és trópusi ciklonok

Az AR6 a következő értékelést nyújtja a trópusi ciklonokról (TC; itt a hurrikánok szinonimájaként használjuk):

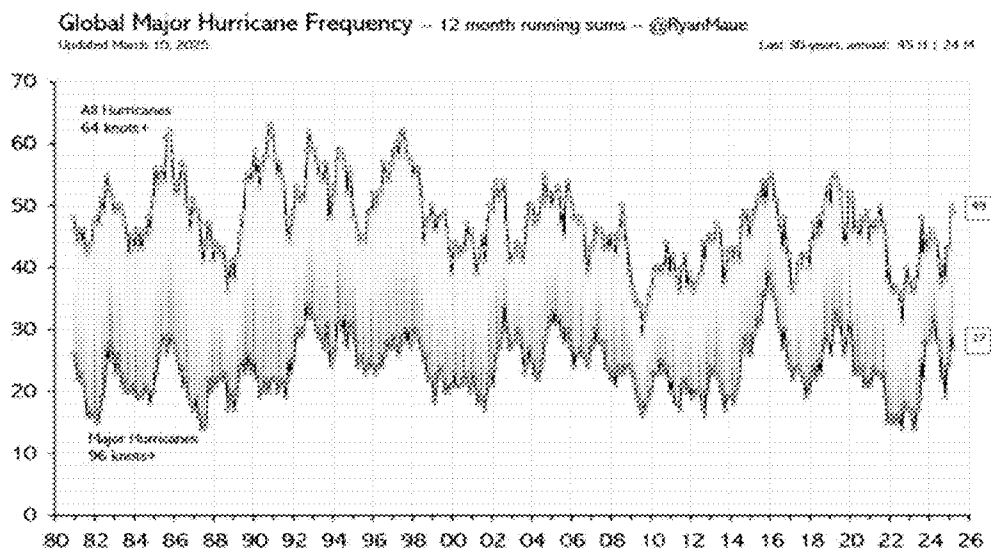
AR6: A legtöbb jelentett hosszú távú (több évtizedestől százévesig terjedő) trend TC gyakoriságát vagy intenzitásalapú mérőszámát illetően *alacsony megbízhatóságú*, ugyanis a legjobb nyomon követési adatok gyűjtésére használt technológia megváltozott. (IPCC, 2021. 1585. o.)

AR6: *Valószínű*, hogy a nagyobb (3–5. kategóriájú) trópusi ciklonok előfordulásának globális aránya az elmúlt négy évtizedben nőtt... *Alacsony a megbízhatósága* a hosszú távú (több évtizedestől százévesig terjedő) trendeknek az összes kategóriájú trópusi ciklonok gyakoriságát illetően (IPCC, 2023. SPM. 9. o.)

AR6: A legjobb nyomon követési adatok egy részhalmaza, amely az Egyesült Államokat 1900 óta közvetlenül érintő hurrikánoknak felel meg, megbízhatónak tekinthető, és **az amerikai partot elérő események gyakoriságában nem mutatkozik trend.** (IPCC 2021, 1585. o.)

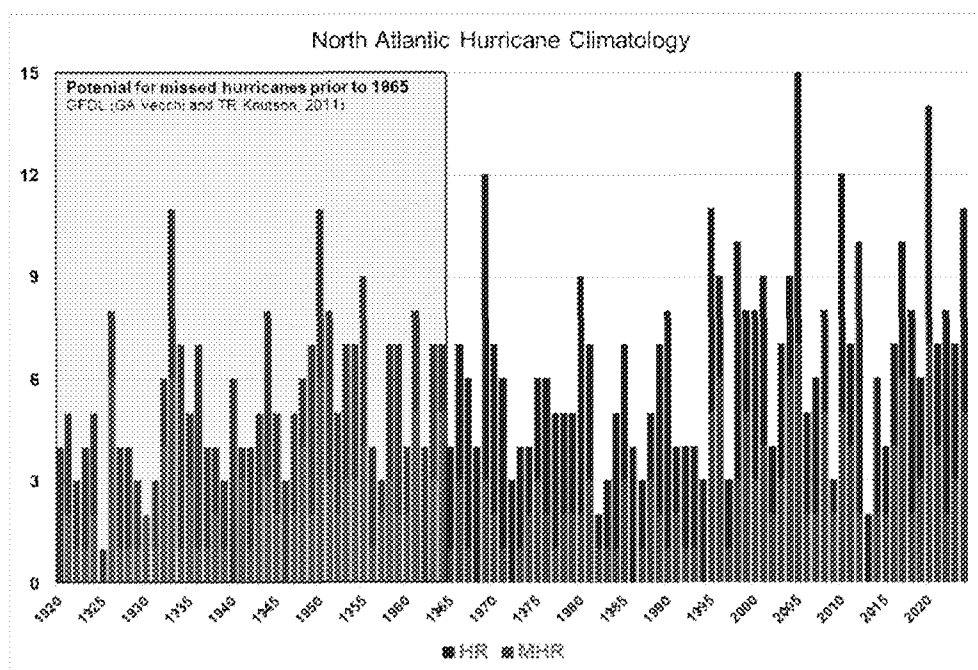
1980 óta, amióta a műholdas megfigyelések teljes mértékben lefedik a globális óceánokat, bizalommal elfogadhatjuk a globális hurrikánok és a nagyobb hurrikánok (3. kategóriájú és magasabb kategóriájú) teljes számaravonatközó adatokat. A 6.2.1. ábra azt mutatja, hogy átlagosan évente körülbelül 50 hurrikán fordul elő, amelyek közül körülbelül 25 éri el a nagyobb hurrikán státuszt (Maue, 2025). Jelentős éves és évtizedes változékonyság figyelhető meg, a hurrikánok számában enyhe csökkenés, a nagyobb hurrikánok számában pedig enyhe, de jelentéktelen növekedés tapasztalható. Ez a két trend együttesen összességében a nagyobb hurrikánok arányának növekedését eredményezi.

A globális hurrikánstatisztikát a Csendes-óceán északnyugati része uralja, amely a teljes globális hurrikánszám ~35 százalékát teszi ki, míg az Atlanti-óceán a globális hurrikánok ~15 százalékát adja (Colorado Állami Egyetem, 2025). Az Atlanti-medencére vonatkozó adatok messzebbre nyúlnak vissza, mint a többi óceánmedencére vonatkozó adatok, és az amerikai politikai döntéshozók számára ezek a legrelevánsabbak.



6.2.1. ábra: A hurrikánok és a nagyobb hurrikánok globális gyakorisága 1980 óta. Forrás: Frissítve Maue 2011 alapján.

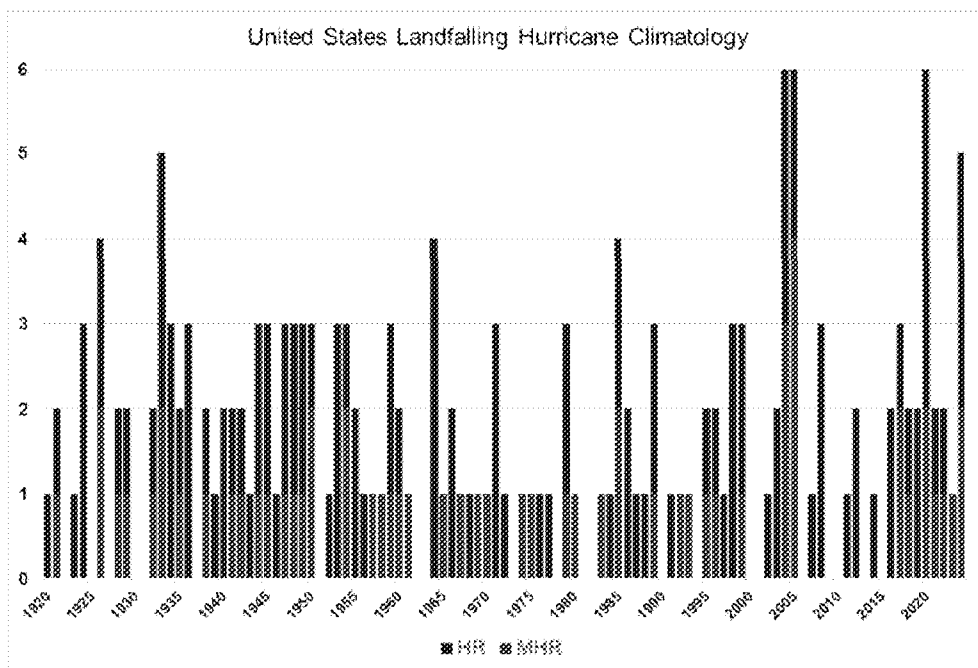
A 6.2.2. ábra az atlanti hurrikánok és a nagyobb hurrikánok (3. kategóriájú és magasabb kategóriájú) gyakoriságát mutatja 1920-ig visszamenőleg. Az 1965 előtti adatok (a műholdas megfigyelések kezdete az Atlanti-óceánon, kékkel árnyékolva) némi alulszámlálásról tanúskodnak, az 1920 előtti adatok pedig jelentős alulszámlálást mutatnak (Vecchi és Knutson, 2011). Az atlanti hurrikánaktivitás minden mérése 1970 óta. jelentős növekedést mutat Az 1971 és 1994 közötti időszakban azonban kivételesen alacsony aktivitás volt megfigyelhető, míg magas aktivitás (az elmúlt két évtizedhez képest, még alulszámlálással is) megfigyelhető volt az 1950-es és 1960-as években, sőt az 1930-as években is.



6.2.2. ábra: Hurrikánok (HR) és nagyobb hurrikánok (MHR) atlanti gyakorisága 1920 óta. Forrás: National Hurricane Center (2024)

A 6.2.2. ábra azt mutatja, hogy az atlanti hurrikánok évtizedes és több évtizedes időléptékekben erősen változnak. E változások elsősorban az Atlanti Többévtizedes Oszillációhoz (AMO) kapcsolódnak, amely a medence egészére kiterjedő tengerfelszín-hőmérséklet és tengerszint nyomásingadozásokban nyilvánul meg, amelyek nagyléptékű óceáni cirkulációs mintázatokhoz kapcsolódnak. Az AMO 1926-1970 között és 1995-től mostanáig meleg fázisú, de 1971-1994 között hűvös fázisú volt. Ez van a legnagyobb hatással van a nagyobb hurrikánok (3+ kategória) számára, amelyeket Goldenberg et al. (2001) a normálisnál nagyobb SST-kkel és a csökkent függőleges nyírással társítottak az AMO meleg fázisában (lásd még: Bell és Chelliah, 2006; Klotzbach et al., 2018).

Klotzbach et al. (2018) átfogó értékelést végzett az Egyesült Államok kontinentális részén 1900 óta partot ért hurrikánok adatairól. A 6.2.3. ábra 2024-ig frissíti elemzésüket. Míg a partra jutó hurrikánok legnagyobb száma 2004-ből, 2005-ből és 2020-ból származik, 1920 óta nincs statisztikailag szignifikáns tendencia. A 6.2.3. ábra a nagyobb hurrikánok partrasérésének idősorait is mutatja (3-5. kategória). A feljegyzések szerint a legintenzívebb év 2005 volt (4 nagyobb hurrikán jutott partra). 2005 után azonban 2016-ig nem volt nagyobb hurrikán az Egyesült Államokban, ami a leghosszabb ilyen időszak 1920 óta.



6.2.3. ábra: Az Egyesült Államokbeli hurrikánok (HR) és nagyobb hurrikánok (MHR) partrajutási gyakorisága 1920 óta. Forrás: NOAA HRD(a) (2024)

A 6.2.3. ábra az Egyesült Államokbeli partrajutási aktivitás jelentős évközi és több évtizedes változékonyságát mutatja. Klotzbach et al. (2018) megvizsgálta, hogyan változnak a partrajutások számai az ENSO (El Niño vs. La Niña) és az Atlanti-óceáni Többévtizedes Oszcilláció (AMO) meleg és hideg fázisai szerint.

Villarini et al. (2012) az Egyesült Államokbeli hurrikánok partrajutásának elemzését nyújtja 1878-ig visszamenőleg. Bár lehetséges, hogy a 19. század végén néhány partrajutás kimaradt a Mexikói-öböl partvidékének ritkán lakott területei miatt, figyelemre méltó, hogy a teljes feljegyzésben a legintenzívebb év 1886, 7 hurrikán partra jutásával, amkkor még az éghajlatra kifejtett emberi hatások sokkal kisebbek voltak, mint manapság.

A 6.2.1. táblázat a 10 legerősebb hurrikánt (és a holtversenyeket) mutatja, amelyek az Egyesült Államok partját érték. Azok közül a hurrikánok közül, amelyek tartósan 240 km/h-nál nagyobb széllél érték partot, a 21. században csak egy fordult elő.

Összefoglalva, a hurrikánaktivitás globális és regionális változékonyságának, valamint trendjeinek elemzése alapot nyújt a változások észleléséhez és okok megértéséhez. A hurrikánaktivitás viszonylag rövid történelmi feljegyzése, és a még rövidebb műholdas korszakból származó feljegyzés nem elegendő annak megállapításához, hogy a közelmúltbeli hurrikánaktivitás szokatlan-e a háttér természetes változékonyságához képest. Az atlanti hurrikánfolyamatokat jelentősen befolyásolják az Atlanti-óceán óceáni cirkulációjának természetes módozatai, nevezetesen az Atlanti-óceán Többévtizedes oszcillációja (AMO). Bár régóta feltételezik, hogy a globális tengerfelszín-hőmérséklet emelkedése a hurrikánok intenzitásának növekedését okozza, a hurrikánadatokban bármilyen jelentős trend azonosítását akadályozza a rövid adathalmaz és a jelentős természetes változékonyság.

A folyamat alapú megértés azt is sugallja, hogy a hurrikánokból származó viharhullámoknak és csapadékmennyiségnek a melegebb hőmérséklettel növekednie kellene. Azonban a változó partszakaszokra érkező hurrikánok viszonylag kis száma és az egyes viharokhoz kapcsolódó összetett dinamika kizárja a változások érdemi kimutatását.

Rank	Year	Landfall Wind (MPH)	Name
1	1935	185	"Labor Day"
2	1969	175	Camille
3	1992	165	Andrew
4	2018	160	Michael
5	1856	150	"Last Island"
5	1886	150	"Indianola"
5	1919	150	-----
5	1932	150	"Freeport"
5	2004	150	Charley
5	2020	150	Laura
5	2021	150	Ida
5	2022	150	Ian

6.2.1 táblázat: Az USA partjai mentén szárazföldre kijutó legerősebb hurrikánok. Forrás: (NOAA HRD(b), 2024)

6.3 Hőmérsékleti szélsőségek

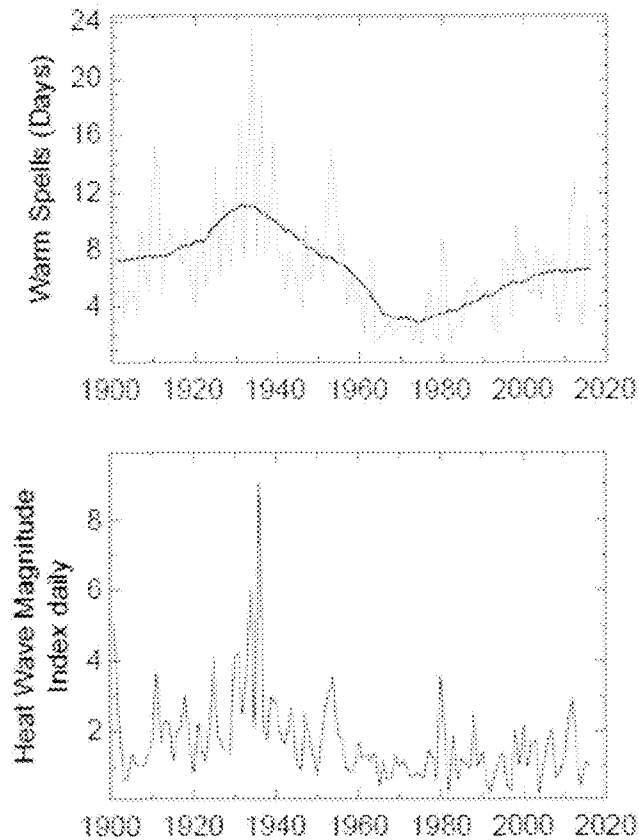
Az AR6 értékelés az 1950 utáni időszakra összpontosított, és a hőhullámok gyakoriságának és intenzitásának növekvő tendenciáiról számolt be. Az NCA4 azonban megjegyezte, hogy az Egyesült Államokban a hőhullám-aktivitás az 1930-as években érte el csúcspontját (6.3.1. ábra).

AR6: *Gyakorlatilag biztos*, hogy a meleg szélsőségek (beleértve a hőhullámokat is) az 1950-es évek óta gyakoribbak és intenzívebbek lettek a legtöbb szárazföldi régióban, míg a hideg szélsőségek (beleértve a hideghullámokat is) ritkábbak és kevésbé súlyosak lettek (SPM, A3.1)

AR6: Észak-Amerikában nagyon erős bizonyítékok vannak a meleg szélsőségek intenzitásának és gyakoriságának *nagyon valószínű* növekedésére, valamint a hideg szélsőségek intenzitásának és gyakoriságának csökkenésére az egész kontinensen, bár a trendekben jelentős térfélt és szezonális eltérések vannak. A minimumhőmérsékletek a kontinensen következtetes melegedést mutatnak, míg az USA egyes részein a napi hőmérsékletek éves maximum értékében ellentétebb trendek figyelhetők meg. (11. fejezet, 1550. o.)

NCA4: A meleg szélsőségek változásai árnyaltabbak, mint a hideg szélsőségeké. Például az elmúlt évszázadban az év legmelegebb napi hőmérséklete a Nyugat egyes részein **emelkedett**, de a Sziklás-hegységtől keletre szinte minden helyen **csökkenés volt** megfigyelhető. Valójában minden keleti régió nettó **csökkenést tapasztalt**, leginkább a Középnnyugaton (kb. 1,2°C) és a Délkeleten (körülbelül 0,8°C). (190-191. o.)

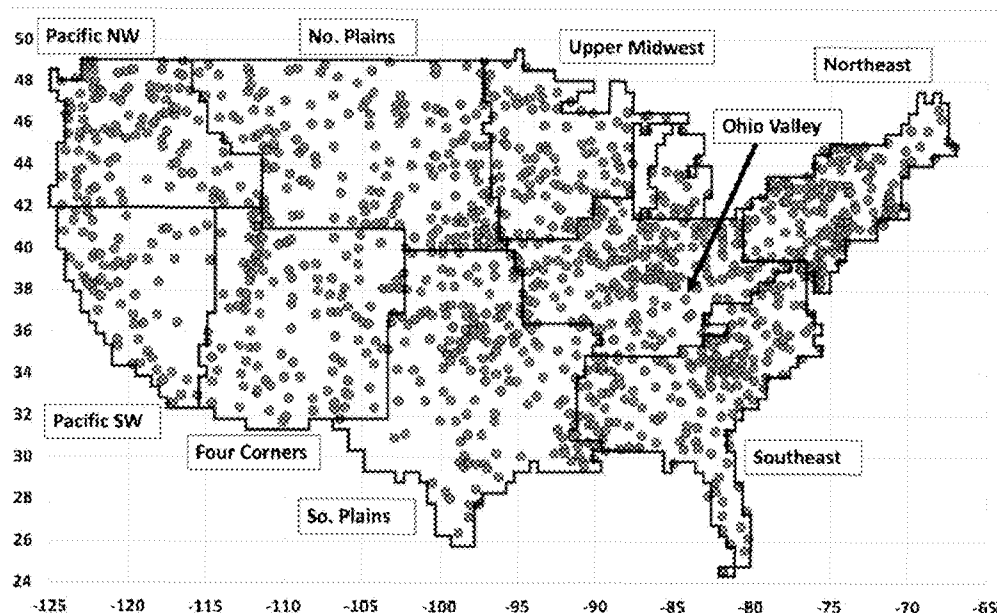
NCA4: Az 1960-as évek közepe óta az év legmelegebb napi hőmérséklete csak nagyon kis mértékben emelkedett (nagy éves eltérések közepette). A hőhullámok (6 napos időszakok, amelyekben a maximális hőmérséklet a 90. percentilis felett volt 1961–1990 között) gyakorisága az 1930-as évek közepéig nőtt, az 1960-as évek közepére jelentősen ritkábbá váltak, majd ezt követően ismét növekedett a gyakoriságuk. A meleg napi hőmérsékletekhez hasonlóan **a hőhullámok nagysága is az 1930-as években érte el a maximumát. (190-191. o.)**



6.3.1. ábra: Hőhullámok az Egyesült Államokban 1900 óta. Forrás: NCA4 6.4. ábra

6.3.1 Az Egyesült Államokban a hőmérséklet egyre kevésbé szélsőséges

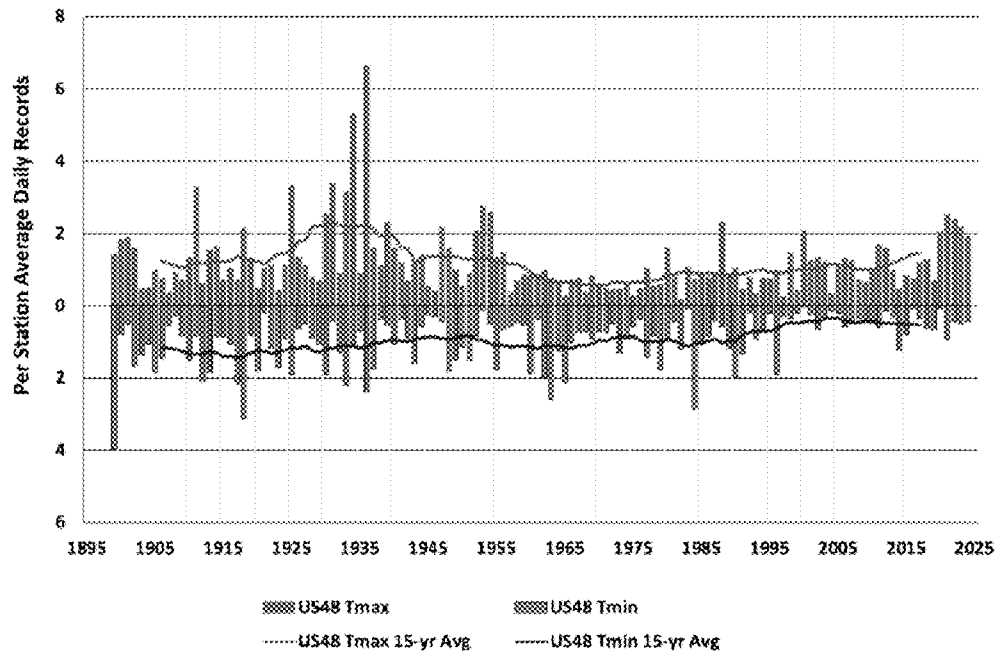
A meleg évszak napi maximumhőmérsékletei (T_{max} , május-szeptember) és a hideg évszak napi minimumhőmérsékletei (T_{min} , december-március) 1898 decemberétől (126 év) kezdődően állnak rendelkezésre. Az adatkészlet 1211 CONUS állomásból áll, amelyeket az Egyesült Államok Történelmi Éghajlati Hálózatának vagy USHCN állomásoknak neveztek el (lásd 6.3.2. ábra; Quinlan et al. 1987, Karl et al. 1990). Ezeket az állomásokat a NOAA választotta ki, mivel a legkevésbé problémásak az adatkimaradások, az állomásáthelyezések és a műszercserék tekintetében. Ahol még mindig hiányosságok vannak, a közeli állomásokat összevonták (a torzítást korrigálva), így az állomások esetében elérhető medián adatmennyiség 98%. Bár az adatkészletben vannak hibák, beleértve a az UHI hatások által okozott, feldolgozatlan hamis felmelegedést is, és amelyek a T_{min} megfigyelését különösen torzítják, ez az adatkészlet a T_{max} hőszélsőségek trendjeinek felméréséhez kellően pontos.



6.3.2. ábra: Az USHCN hőmérsékleti állomásainak helyszínei. Forrás: USHCN.

Azzal a kérdéssel kezdjük, hogy vajon változott-e a napi rekordmagas vagy alacsony hőmérsékletek előfordulása 1898 decembere óta. Minden meleg évszak 153 napból áll (május 1. és szeptember 30. között), és minden hideg évszak 122 napból (december 1. és március 31. között). Minden állomásra és napra kiszámítottuk azt az évet, amelyben a rekordmagas (legalacsonyabb) hőmérséklet előfordult. 126 évnél megfigyelés alapján, ha nem lennének hőmérsékleti trendek az idő múlásával, a Tmax várható rekordszáma állomásonként és évente 1,21 ($=153/126$), a Tmin esetében pedig állomásonként és évente 0,96 ($=122/126$) lenne.

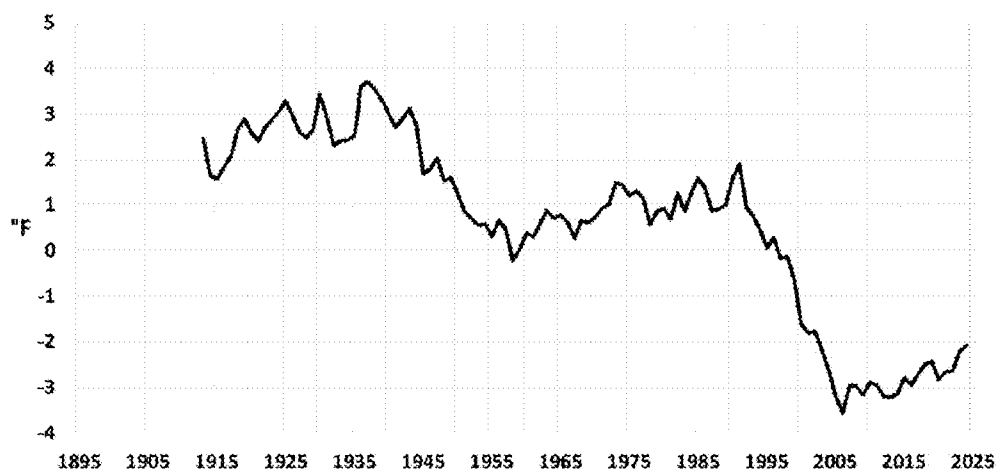
A 6.3.3. ábra ezen extrém események előfordulásának időbeli eloszlását mutatja. A CONUS meleg évszakai szélsőségeinek számos mérőszámában van egy közös vonás - az 1920-as és különösen az 1930-as évek kivételes hősége, amely 1936-ban tetőzött. Állomásonkénti átlagban a Tmax rekordok 60 százaléka és a Tmin rekordok 59 százaléka az időszak első felében (1899-1961 között) történt.



6.3.3. ábra: A napi rekordok száma a meleg és hideg évszakokban a CONUS-ban. A vonalak a 15 éves, közép-re igazított átlagot jelölik. Forrás: 1211 USHCN állomás, a megfigyelések legalább 92 százalékának eléréséhez az 1898 decembere óta eltelt 126 éves időszakban szükség szerint kiegészítve. US48: összefüggő amerikai államok. Tmax: maximum hőmérséklet. Tmin: minimum hőmérséklet.

A hideg oldalon a CONUS által tapasztalt legkiterjedtebb hideg szélsőség az 1899 februárjában, Bálint-napon bekövetkezett sarkvidéki betörés volt. A második helyen az 1917-es betörés áll. A hidegrekordok gyakorisága csökkent, különösen az időszak utolsó negyedében, amikor a szélsőséges hidegeseményeknek csak 13 százalékát mérték. Ezzel szemben az utolsó negyedben a szélsőséges Tmax rekordok 25 százalékot érték el, a statisztikai várakozásoknak megfelelően. Ezeket az általános jellemzőket a korábbi értékelések is kimutatták (lásd fent, IPCC AR6, NCA4). A két előzmény kombinálásával a hideg és meleg szélsőségek számának összességében bekövetkezett csökkenése az elmúlt évszázadban egy olyan éghajlatra utal, amely kevésbé hajlamos a szélsőségekre.

Ez a mintázat látható a 6.3.4. ábrán is. Az összes állomásra és mindegyik évre kiszámították a legmelegebb meleg évszak és a leghidegebb hideg évszak hőmérsékleteit. Ezután állomásonként kiszámították a különbségeket, és földrajzilag átlagolták az összes állomáson, így megkapták az egyes évekre vonatkozó helyi szélsőséges hőmérsékletek várható tartományának éves mértékét. A 6.3.4. ábra ennek a mutatónak a 15 éves utolsó átlagát mutatja, ami az elmúlt évszázadban egyértelműen csökkent.



6.3.4. ábra: Az egyes állomások legmelegebb meleg évszaki Tmax és leghidegebb hideg évszaki Tmin értékei közötti különbség 15 éves, a hosszú távú átlaghoz viszonyított különbségének átlaga. Forrás: Szerzői elemzés az USHCN adatai alapján.

Az egyes állomások legmelegebb nyári Tmax és leghidegebb téli Tmin értékei közötti átlagos különbség az elmúlt 126 évben körülbelül 5°F-kal csökkent. A csökkenés főként a melegebb téli Tmin értéknek köszönhető, de a nyári Tmax csökkenése is szerepet játszik. A Tmin emelkedése szorosan összefügg a meteorológiai állomások körüli mesterséges felületek növekvő jelenlétével az elmúlt több mint 100 évben (az úgynevezett városi hősziget-hatás; 3.3. szakasz, Karl et al. 1988, Runnals és Oke 2006, valamint Spencer et al. 2025).

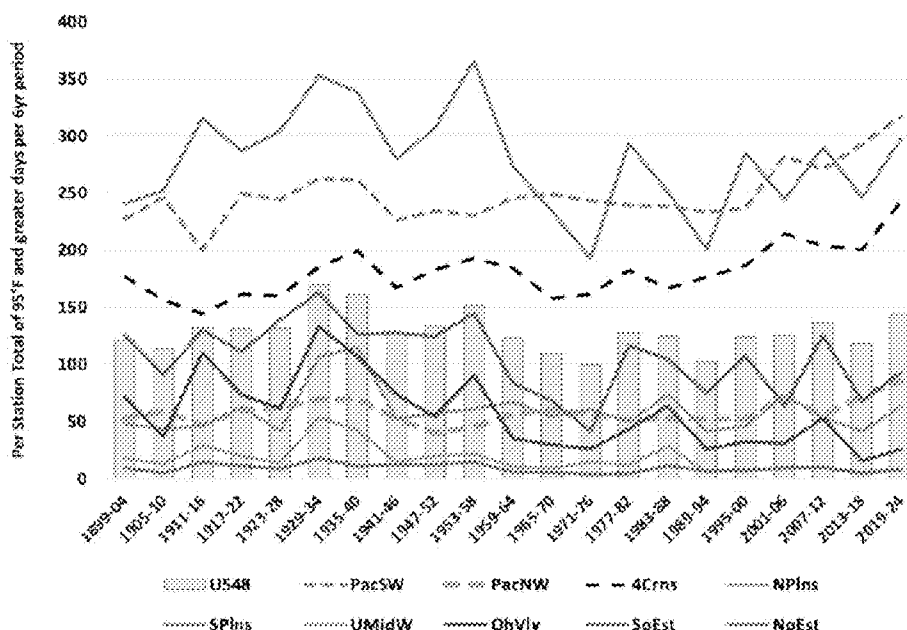
Összefoglalva, míg az Egyesült Államokban rendszeresen tapasztalhatók szélsőséges hőmérsékleti események, és nagy médiafigyelmet kapnak, a hosszú távú feljegyzések azt mutatják, hogy az Egyesült Államok éghajlata az idő múlásával kevésbé szélsőséges (enyhébbé) vált, ha a meleg évszak maximumai és a hideg évszak minimumai közötti tartományt mérjük.

6.3.2 Hőküszöb-túllépések

„A szélsőséges hőmérsékleti események kockázata változik” címszó alatt a legfrissebb amerikai nemzeti éghajlat-értékelő jelentés (NCA5) megjegyzi a 95°F-os vagy annál magasabb napok számának küszöbértékének növekedését, kijelentve:

Az Egyesült Államok nyugati részét az 1980-as évek óta különösen sújtja a szélsőséges hőség..., a 95°F feletti napok számának nagyobb növekedését tapasztalva, ami várható is volt a régióban a keleti USA-hoz képest nagyobb mértékű felmelegedés miatt. 2018 óta számos jelentős hőhullám sújtotta az Egyesült Államokat, köztük egy rekordot döntő esemény a Csendes-óceán északnyugati részén, 2021-ben.

Változik-e a 95°F-os napok előfordulása? Egy olyan változatos éghajlaton, mint a CONUS, a küszöbérték statisztikák félrevezetőek lehetnek. Egy olyan régióban, ahol sok állomás nyáron 95°F-hoz közeli Tmax átlaghőmérséklettel rendelkezik, a metrikában nagy ingadozások tapasztalhatók, amennyiben csak kis változások történnek az átlaghőmérsékletben. Másutt, ahol az állomások ritkán érik el, vagy gyakorlatilag mindig elérik a 95°F Tmax hőmérsékletet, egy kis változásnak nincs nagy hatása az eredményekre.



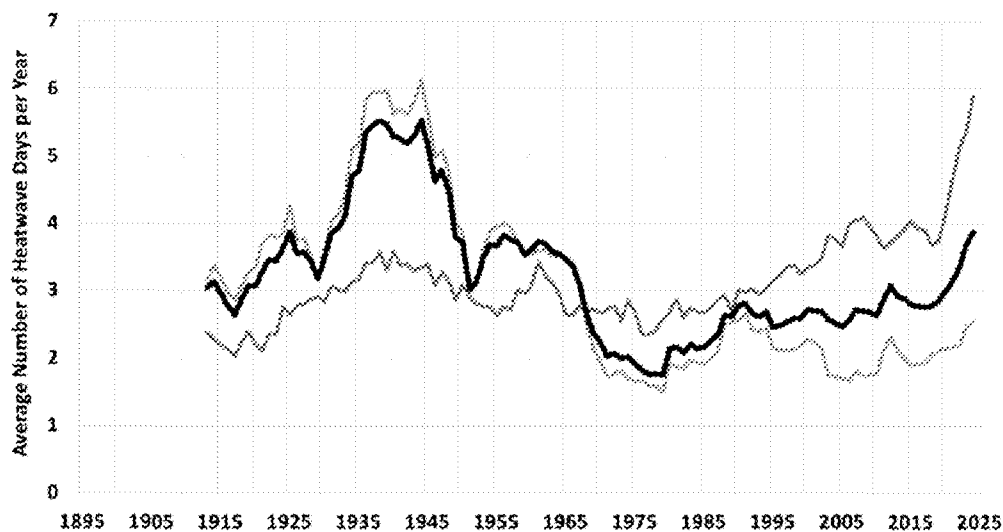
6.3.5. ábra: $\geq 95^{\circ}\text{F}$ napok száma 6 éves időszakokban, USA 48 (oszlopok) és régiók (vonalak). 6 éves időszakot használunk, mivel ez egyenletesen osztja el a 126 éves rekordot. Az eredmények robusztusak a 2 és 11 nap közötti időszakok használatára. USA 48: összefüggő amerikai államok. A régióneveket lásd a 6.3.2. ábrán. Forrás: Az USHCN adatainak szerzői elemzése.

Az elmúlt 126 évben az átlagos CONUS állomás 6 éves időszakonként 129 olyan napot tapasztalt, amikor a hőmérséklet meghaladta a 95°C -ot, de a regionális értékek 278-tól (Déli-síkság) 9-ig (Északkelet) terjednek. Ezért az ilyen küszöbérték-elemzéseket óvatosan kell értelmezni. A 6.3.5. ábra azt mutatja, hogy a kilenc régió közül csak háromban (mind a nyugati oldalon) tapasztaltak növekvő tendenciát a 95°F -os vagy annál melegebb napok számában (szaggatott vonalak). A CONUS egészében nem, a másik hat régióban pedig csökkenés tapasztalható.

Az NCA5 idézetben említett 2021-es csendes-óceáni északnyugati hőhullámot a 8.6.1. szakaszban részletesebben is megvizsgáljuk. A bizonyítékok arra utalnak, hogy ez egyetlen, példa nélküli esemény volt a feljegyzésekben, és nem része a fokozódó szélsőséges hőség mintázatának. Például az 5 napos átlagos troposzférikus rácspont-hőmérsékleti anomália a csendes-óceáni északnyugati régióban az esemény során $+10,8^{\circ}\text{C}$ volt, ami az északi féltéke legszélsőségesebb rácspont-nyári anomáliája az elmúlt 46 évben, több mint 4 millió rácspont alapján. Ezzel szemben a globális hőmérsékleti anomália ebben az időszakban gyakorlatilag nulla volt ($+0,03^{\circ}\text{C}$, Mass et al. 2024).

6.3.3 Hőhullámok

A hőhullámoknak (egymást követő napoknak, amelyek meghaladják az extrém küszöbértéket) nagyobb társadalmi hatásuk van, mint egyetlen napi rekordhőmérsékletnek. A „hőhullám napokat” itt úgy mérjük, mint az összes olyan nap számát május-szeptemberben, amelyek meghaladják az adott nap 90. percentiliséét, és amelyek legalább hat egymást követő napos időszakon belül esnek. Ez egyenértékű az NCA4-ben használt módszerrel, azzal a különbséggel, hogy a referencia-időszak itt a teljes 1899-2024 közötti időszak, míg az NCA4 a referencia-időszakot a hűvösebb 1961-1990 közötti időszakra csonkolta. (Az alább látható eredmények mintázata nem függ a referencia-időszak megválasztásától.) Ez a csonkolás növeli a pozitív eredményeket (a 90. percentilist meghaladó napok) a referencia-időszakra, különösen 1960-tól kezdődően és a jelenig terjedően (lásd a 6.3.6. ábrát és az alábbi tárgyalást).

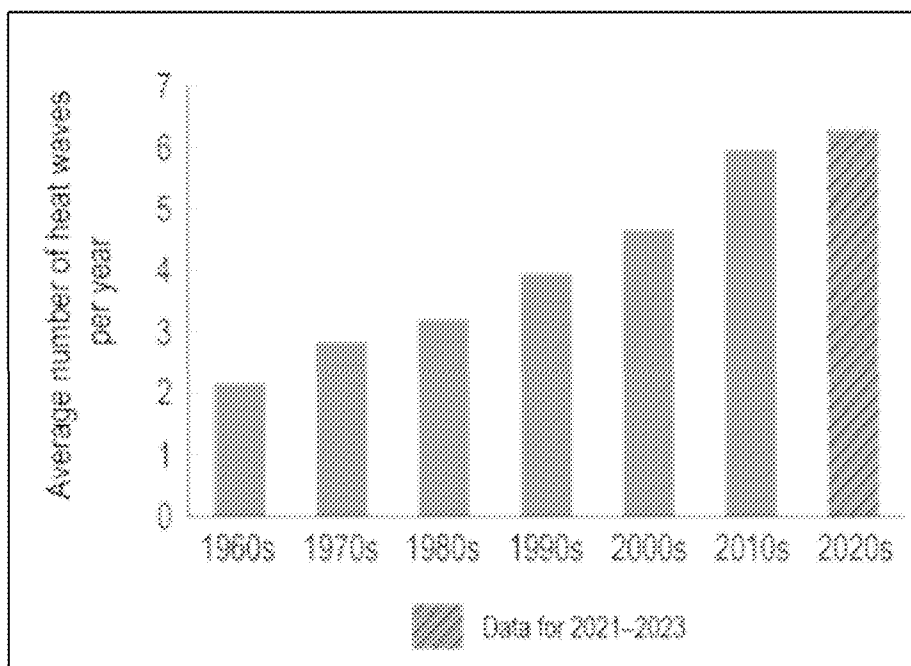


6.3.6. ábra: A hőhullámos napok számának 15 éves átlaga állomásonként a CONUS-ban (fekete vonal) és két régióban: Nyugat (piros), Közép-Kelet (zöld).

A 6.3.6. ábra azt jelzi, hogy a hőhullám-aktivitásban regionális eltérések vannak. A 20. század első felének túlzott hősege elsősorban az ország keleti kétharmadában jelentkezett, míg a közelmúltban a hőhullámos napok számának növekedése Nyugaton tapasztalható (NCA5). Ez azt jelzi, hogy a háttér meleg évszaki cirkulációja a 20. század első felében a keleti országrészekben kedvezett a hőhullámoknak, de a 21. században a mintázatok a nyugati részekben kedveztek a hőhullámoknak. A CONUS egészére nézve a hőhullámok ma sem gyakoribbak, mint egy évszázaddal ezelőtt, ami összhangban van az NCA4-ből vett 6.4.1. ábra felső paneljével.

Ez a mutató régióként jelentősen eltérő. A négy északi régió (Csendes-óceáni ÉNY, Északi-síkság, Felső-Középnnyugat és Északkelet) átlagosan 15-27 hőhullámos napot tapasztal 15 éves időszakonként. Ezzel szemben az öt déli régió (Csendes-óceáni Délnyugat, 4-Corners, Déli-síkság, Ohio-völgy és Délkelet) 37-54 ilyen napot tapasztal, ami lényegében kétszer annyi. Ez arra utal, hogy a nyári cirkulációs mintázat a déli régiókban hajlamosabb az állandó eseményekre, míg az északi régiókban az átmeneti rendszerek gyakoribbak, és így lerövidítik ezeket a potenciálisan hosszabb eseményeket.

A hőhullámok elemzése jó példa arra, hogy miért fontos a teljes adatkészletek és a megfelelő mérőszámok figyelembevétele. Az NCA5 a <https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves> (USGCRP 2023) weboldalra irányítja az olvasókat, ahol megtekinthetik a városi hőhullámok évtizedenkénti számát az 1960-as évektől kezdve. Ezt a 6.3.7. ábrán mutatjuk be.



6.3.7. ábra: A városi hőhullámok átlagos száma évente 50 nagy amerikai nagyvárosi területen, de a szövegben kifejtett okok miatt ez egy félrevezető mutató. Forrás: <https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves> (hozzáférés: 2025. május 22.).

Az ábra évtizedenként monoton növekedést mutat, az 1960-as években évente két előfordulás volt, a 2020-as években hat. A hőhullám használt definíciója az emberi kellemetlenségek szokatlan, de gyakorlatias mérőszáma – legalább két egymást követő napból álló időszak, amikor a *minimális* látszólagos hőmérséklet (a hőmérséklet és a páratartalom kombinációja) meghaladja a 85. percentilist. Azt is meg kell jegyezni, hogy az adathalmaz az 50 legnagyobb amerikai városra korlátozódik.

A szokatlan hőhullám-definíció és a városi fókusz miatt az USGCRP (2023) által bemutatott, 1960 óta növekvő értékek a hosszú távú trendeket és az üvegházgáz-kibocsátás hatását illetően legalább két okból nem informatívak. Először is, ahogy a 6.3.1. és 6.3.6. ábrán látható, az 1960-as volt a leghidegebb évtized, az 1970-es pedig a második leghidegebb évtized az 1910-es évek óta, így ez a kezdő dátum az idősorban kedvez a növekedés kimutatásának. Másodsor, az 1960 utáni urbanizáció ezekben a városokban jelentős tényező a Tmin emelkedésében az állandósult Tmax-hoz és a közeli vidéki állomások Tmin-jéhez képest (Karl et al. 1988, Runnals és Oke 2006, Christy et al. 2009, McNider et al. 2012). Ez nem zárja ki az éjszakai hőmérsékletek valódi emelkedését az Egyesült Államok nagyobb városaiban, és az ezekkel a változásokkal járó társadalmi hatásokat. Megjegyezzük azonban, hogy számos okból kifolyólag a nyári Tmax (különösen a vidéki területeken) jobb mérőszám a háttérklíma változásai által befolyásolt hőhullámok változásainak kimutatására, például ami a növekvő üvegházhatású gázkoncentráció miatt következik be (Christy et al. 2009). A CONUS egészére vonatkozóan az ebben a szakaszban található bizonyítékok arra utalnak, hogy az üvegházgáz-kibocsátás az urbanizáció és a természetes éghajlati változékonyság háttérében csekély vagy semmilyen hatással nem volt a hőhullámokra. Függetlenül a regionális trendek végső okától, a hőhullámoknak fontos társadalmi hatásai vannak, amelyekkel foglalkozni kell, amint azt a 10. fejezetben tárgyaljuk.

TUDÁSDOBOZ: A rövid adatsorok veszélyei

San Francisco jó esettanulmányt nyújt a rövid történelmi minták használatának korlátairól a szélsőséges események természetes változékonyságának jellemzésére. Tegyük fel, hogy San Francisco napi csapadékmennyiségéből az 1895 és 2024 közötti 130 éves mintát használjuk, és 3, 5, 14 és 30 napos csapadékrekordokat keresünk. Az eredményeket a 6.2. táblázat mutatja.

Event	Record (inches)	Year
3-day	6.94	2023
5-day	8.55	2023
14-day	12.62	2023
30-day	18.93	1998

6.2. táblázat: Szélsőséges csapadékmennyiségek, San Francisco, 1895-2024

A rekordok mind a közelmúltbeli évekre összpontosulnak. 2023 kivételes évnak tűnik, és mivel a minta vége felé közeledik, arra utalhat, hogy az éghajlat veszélyesebb állapotba került, talán emberi hatások miatt. [A „2023” megjegyzés azt jelzi, hogy az esemény a 2022 augusztusa és 2023 júliusa közötti vízévben történt.]

De teljesen más képet kapunk, ha egy 45 évvel korábban, 1850-ben kezdődő adatsort használunk. A 6.3. táblázat azt mutatja, hogy a rekorddöntő események mind az 1860-as években történtek. Továbbá 2023 már nem is a 2. helyen áll, hanem a 3. vagy 4. helyre csúszik vissza. A két diagram adatainak összehasonlítása azt mutatja, hogy az 1862-es és 1867-es szélsőséges csapadékesemények lényegesen több csapadékot tartalmaztak, mint az 1998-as és 2023-as események, a 14 és 30 napos összesített értékek pedig körülbelül 50 százalékkal magasabbak voltak.

Event	Record (inches)	Year	Rank of 130-yr extreme listed in Table 6.2
3-day	8.85	1867	3
5-day	9.80	1867	3
14-day	19.05	1862	4
30-day	28.25	1862	2

Table 6.3: Extreme rainfall records, San Francisco, 1850-2024.

6.3. táblázat: Szélsőséges csapadékmennyiségek, San Francisco, 1850-2024.

A természetes változékonyság mértéke még jobban megmutatkozik, ha a paleoklíma-bizonyítékokat is megvizsgáljuk. Porter et al. (2011) felfedezték, hogy a legutóbbi 1800 évben legalább hat megavihar volt intenzívebb, mint a régiót sújtó, pusztító erejű 1861-62-es ARkStorm. Nyilvánvaló, hogy az ilyen szélsőséges események, amelyekre az 1895-2024-es idősorunkban „példátlan” volt, körülbelül 300 évente sújtják a régiót, bár 1895 óta nem történt ilyen.

E példa a viszonylag rövid éghajlati időszakok (~130 év) használatának korlátait szemlélteti az általános természetes változékonyság, és különösen a szélsőséges események jellegének és mértékének felmérésében. A természetes változékonyság teljes tartományának pontos ábrázolása minden attribúciós elemzésben elkerülhetetlen (8.6. szakasz). Az infrastruktúra-tervezők, a katasztrófavédelmi intézmények és az attribúciós kutatók akkor értenék meg egy jövőbeli szélsőség nagyságának jelentős téves jellemzését, ha csak az elmúlt 130 év megfigyeléseire alapoznának. Ebben az esetben egyetlen 130 éves időmintavétel akár 50 százalékkal is alábecsüli azt a szélsőséges értéket, ami mindössze 45 évnyi megfigyelés hozzáadásával határozható meg. Az ezrezeres léptékű paleoklíma bizonyítékokhoz képest még nagyobb alulbecslés történne. Fontos tanulság, hogy az éghajlat önmagában is okozhat nagy meglepetéseket, még emberi befolyás nélkül is.

6.4 Szélsőséges csapadék

Az AR6 értékelése szerint az 1950-es évektől kezdődő adatokban a heves csapadékmennyiség növekedését figyelték meg.

AR6: Az 1950-es évek óta a **heves csapadékesemények gyakorisága és intenzitása nőtt** a legtöbb olyan szárazföldi területen, amelyről a megfigyelési adatok elegendőek a trendelemzéshez (nagy megbízhatóság). (SPM A3.2)

AR6: Észak-Amerikában szilárd bizonyítékok vannak arra vonatkozóan, hogy a szélsőséges **csapadékmennyiség nagysága és intenzitása nagy valószínűséggel nőtt** az 1950-es évek óta. Mind az [egynapos maximumok], mind az [5 napos maximumok] jelentősen megnöttek Észak-Amerikában 1950 és 2018 között. (11. fejezet, 1560. o.)

Az Egyesült Államok nemzeti éghajlat-értékelései (NCA4, NCA5) kiemelték a leghevesebb (különböző módokon definiált) csapadékesemények előfordulásának növekedését, elsősorban a CONUS keleti felében, különösen az északkeleti részén, akár 1901-ben, akár 1958-ban kezdődik az elemzés. Érdekes módon a regionális eltérések azt mutatják, hogy a szélsőséges csapadékesemények legnagyobb növekedése északkeleten, a legkisebb pedig nyugaton figyelhető meg, ami ellentétes a hőmérsékleti szélsőségek változásaival (6.3.6. ábra).

McKittrick és Christy (2019) hosszú távú és következetes állomási megfigyeléseket végeztek a szélsőséges napi csapadékmennyiségről, hogy teszteljék az NCA állításainak egy részét a délkeleti és nyugati partra vonatkozóan egy olyan trendmodell segítségével, amely nem paraméteres varianciabecslést tartalmazott, és ami robusztus a csapadékadatok komplex autokorrelációs tulajdonságaival szemben. Amikor az idősorokat visszafelé kiterjesztették (egy esetben akár 1872-ig), vagy később (1978) kezdték, egyik régióra sem kaptak szignifikáns trendet.

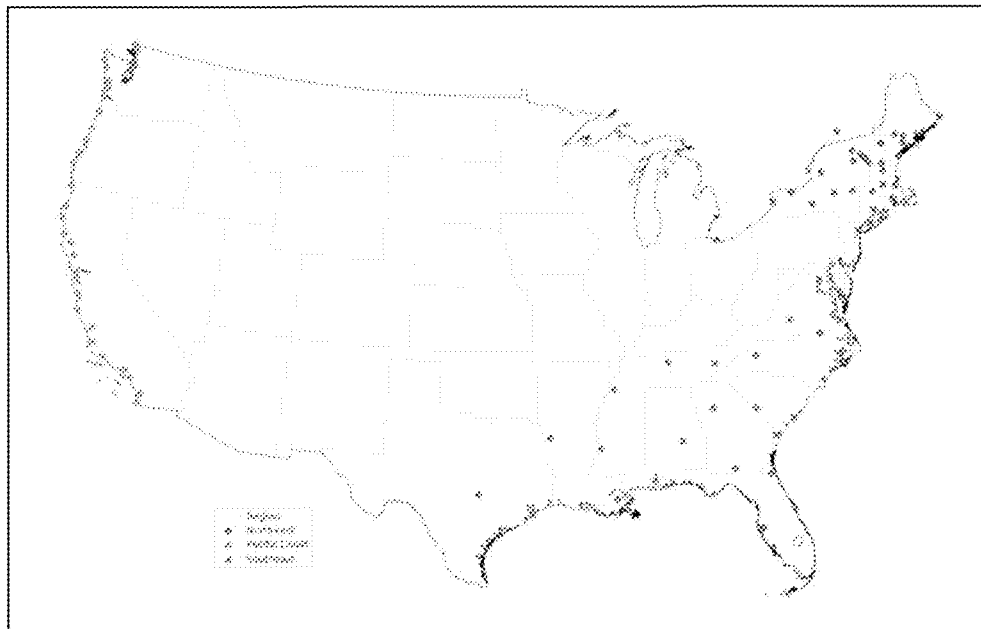
Ezen eredményeket ehhez a jelentéshez (McKittrick és Christy 2025) hasonlóan felépített megfigyelésekkel frissítettük: 29 állomással a CONUS csendes-óceáni partvidékén (1893, San Diegótól (Kalifornia) Blaine-ig (Washington)) és 24 állomással a párás délkeleten (1872, Austintól (Texas) Washington DC-ig). Továbbá az északkeleti területet 27 állomással bővítettük (1888, Buffalótól (New York) Eastportig (Maine)). A helyszíneket a 6.4.1. ábra mutatja. Az állomásokat a hosszú távú, kiváló minőségű adatok elérhetősége alapján választottuk ki. A régiók mindegyike mutatja a szélsőséges csapadékviselkedés fontos jellemzőit: a csendes-óceáni partvidék a partra érkező légköri folyókkal van összefüggésben, amelyek esetében az AR6 1948 óta növekvő aktivitásról szolgáltat bizonyítékokat, és azt állítja, hogy a világ melegedésével további növekedés várható (AR6 8.3.2.8.2); az NCA jelentése szerint az északkeleten tapasztalták a szélsőséges események legnagyobb mértékű növekedését. Az NCA-k a délkeleti területet is megemlítették, mint a szélsőséges események megnövekedésével jellemzett területet. McKittrick és Christy (2019) elemzését alkalmazva a régiónkénti eredmények (és azok magyarázatai) a következők voltak.

Heves esőzések a Csendes-óceáni parton

- Az átlagos csapadékmennyiség trendje statisztikailag szignifikáns (csökkenő) Astoriában, (Oregonban); máshol nem szignifikáns.
- A csapadékmennyiség változásának trendje pozitív és szignifikáns Big Surben (Kaliforniában); máshol nem szignifikáns.
- A napi maximális csapadékmennyiség trendje pozitív és szignifikáns Aberdeenben (Washington államban) és Big Surben (Kaliforniában), valamint negatív és szignifikáns az Oregonbeli Newportban (máshol nem szignifikáns).

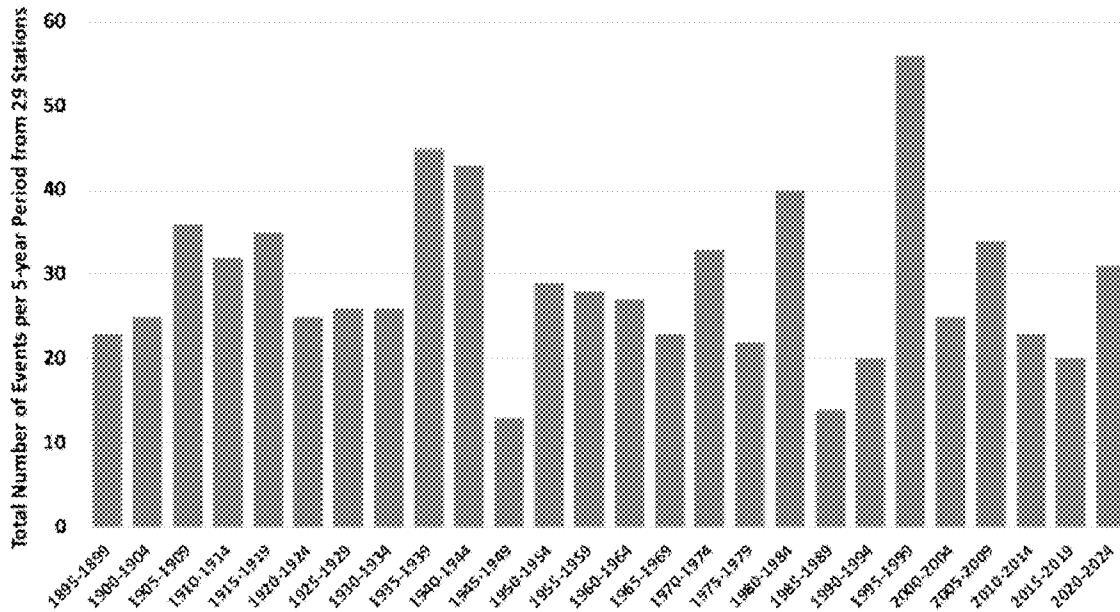
- A régió összes állomásának átlagában e három trendparaméter egyike sem mondható statisztikailag szignifikánsnak.

A Csendes-óceáni partvidék jelentős mennyiségű csapadékot kap a légköri folyók (AR) eseményeiből, amelyek gyakran tartanak egy-két napnál tovább (pl. Gershunov et al. 2017, Pan et al. 2024). A közelmúlt történelmének legrosszabb ilyen eseménysorozata az úgynevezett ARkStorm volt, amely 1861 decemberében és 1862 januárjában történt; Kalifornia egyes részeinre közel 3 méternyi esőt zúdított, és a teljes Central Valley-t hetekre helyenként 4,5 méternyi vízzel borította (Brewer 1930, Null és Hulbert 2007). Ezenkívül paleoklíma-kutatók Kaliforniában a legutóbbi 1800 évben hat, az 1861–1862-esnél hevesebb megárvihart találtak, körülbelül 300 éves időközönként (Porter et al. 2011).

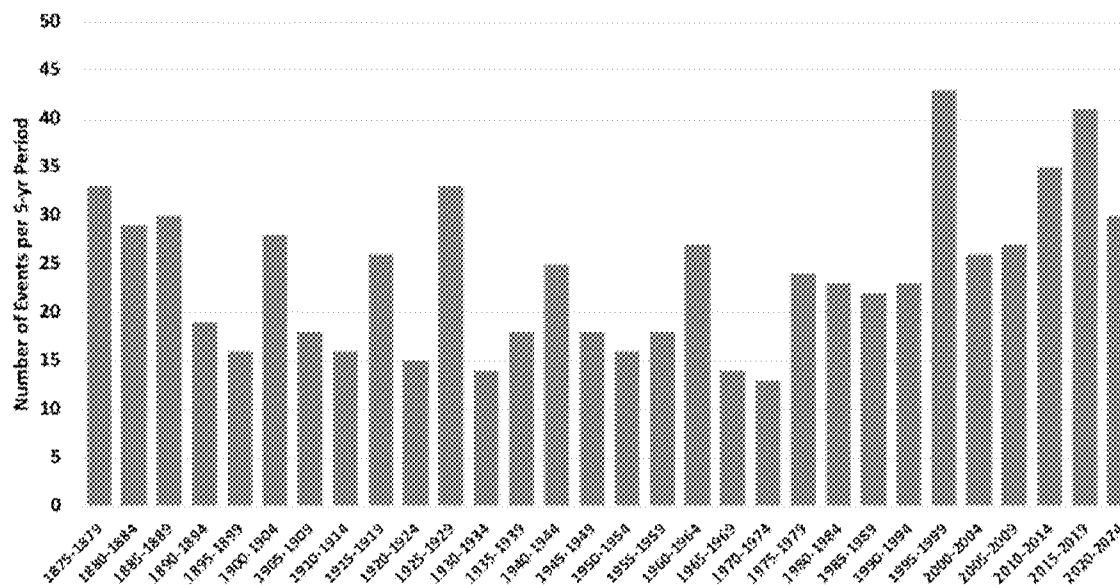


6.4.1. ábra: A jelentésben használt csapadékmérő állomások helyszínei. Narancssárga: Csendes-óceáni partvidék. Kék: Északkelet. Zöld: Délkelet. Adatok: McKittrick és Christy (2025).

Az 5 napos özönvizek előfordulását a következőképpen vizsgáljuk meg. A csendes-óceáni partvidéket példaként véve, egy 130 éves időszak 5 éves intervallumotkból 26-ot tartalmaz. Minden helyszínen kiszámítottuk az év 5 napos csapadékösszegét, és kiválasztottuk a mintában a 26 legmagasabb értéket. Egyetlen évben a 26 leghevesebb közül több is előfordulhat. Ezek mindegyike 5 évente 1-szer előforduló eseménynek tekinthető. Ha nincsenek trendek a csapadékmennyiségben, akkor ezeknek az eseményeknek az összes állomáson egyenletesen kell eloszlania az évek során. A 6.4.2. ábrán ezen események időbeli eloszlását mutatjuk be a csendes-óceáni parton. Jól láthatóak az 1997-98-as nagyszabású El Niño eseményhez kapcsolódó özönvizek. Bár szeszélyesek, ahogy az az ilyen csapadékmennyiség-mérőszámokra jellemző, nincs arra utaló jel, hogy idővel gyakoribbá válnának.



6.4.2. ábra: A 26 legsúlyosabb (5 évenként 1) előfordulás időbeli eloszlása 5 éves időszakokra a csendes-óceáni parton található 29 állomáson.



6.4.3. ábra: Mint a 6.4.2. ábrán, de a legsúlyosabb 30 (5 évenként 1) eseményre vonatkozóan 24 állomáson a párás délkeleti régióban, Austintól Washington DC-ig, 5 éves időszakokra bontva, 1875-2024 között.

Délkeleti heves esőzések

- Az átlagos csapadékmennyiség trendje pozitív és statisztikailag szignifikáns Mobile-ban (Alabama) és Quitman-ben (Georgia), de másutt nem szignifikáns.
- A csapadékmennyiség változásának trendje pozitív és statisztikailag szignifikáns Mobile-ban (Alabama), de másutt nem szignifikáns.
- A napi maximális csapadékmennyiség trendje pozitív és szignifikáns Vicksburg-ban (Mississippi) és Norfolk-ban (Virginia), de másutt nem szignifikáns.
- A régió összes állomásának átlagában e három trendparaméter egyike sem mondható statisztikailag szignifikánsnak.

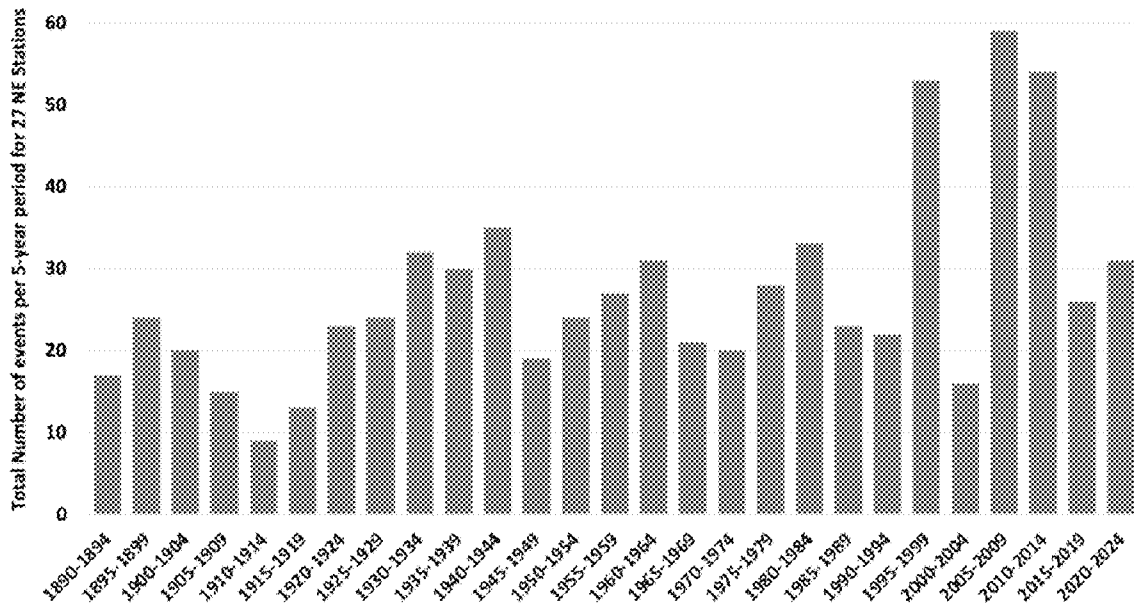
A 6.4.3. ábra analóg a 6.4.2. ábrával az elmúlt 150 évre vonatkozóan a délkeleti párás zónában. Az 5 évente 1 alkalommal előforduló heves esőzések 5 napos összesítéseinek időbeli mintázata általában nem figyelemre méltó, bár 1995 és 2019 között magasabb értékek csoportja jelenik meg. Az ezekben az években tapasztalt növekedés nagyrészt a 4 legészakkeletibb állomásnak köszönhető: Wilmington NC, Weldon NC, Washington DC és Norfolk VA. Ez megerősíti az NCA4 és NCA5 által jelzett mintázatot – a heves esőzések gyakoriságának növekedését a trópusi viharok keleti (Észak-Karolinától Maine-ig tartó) időbeli csoportosulása miatt, amelyet alább tárgyalunk. Egyébként a fennmaradó 20 állomás a heves esőzések időbeli eloszlása szempontjából nem figyelemre méltó.

Északkeleti heves esőzések

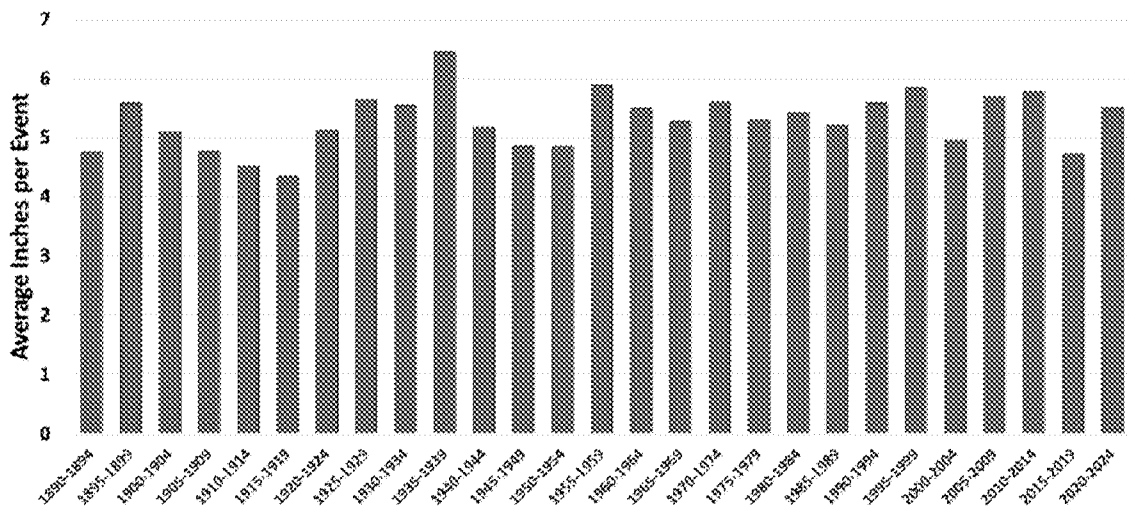
- Az átlagos csapadékmennyiség trendje pozitív és statisztikailag szignifikáns a 27 helyszínből 12-ben, valamint a regionális átlagban is.
- A csapadékmennyiség ingadozásának trendje pozitív és szignifikáns Portland ME, Albany NY, Buffalo NY és Eastport ME városában, de máshol nem szignifikáns.
- A napi maximális csapadékmennyiség trendje pozitív és szignifikáns Portland ME, Gardiner ME és Eastport ME városában, de máshol nem szignifikáns.
- A régió összes állomására átlagolva sem a csapadékmennyiség ingadozásában, sem a maximum csapadékmennyiségben nincs statisztikailag szignifikáns trend.

A 6.4.4. ábra analóg a 6.4.2. ábrával az elmúlt 135 évben az északkeleti 27 állomáson (beleértve Montrealt is Kanadában). Itt 3 napos összesítéseket használunk, mivel ez eredményezte a legnagyobb időbeli eltéréseket. Ebben a régióban az események 77 százaléka júniustól októberig következik be, és hurrikánok, trópusi viharok vagy extratrópusi rendszerekbe átmenő trópusi viharok betörései dominálnak bennük. Az NCA4 és NCA5 szerint ebben a régióban tapasztalták a szélsőséges események legnagyobb növekedését, ezért ezt érdemes közelebbről megvizsgálni.

Észrevehető a szélsőséges események egyfajta csoportosulása 1995 és 2014 között. Howarth et al. (2019) egy hasonló régiót vizsgáltak, mint ami a 6.4.4. ábrán szerepel. Magában foglalja Pennsylvaniát és New Jersey-t, és jelentős különbségekről számoltak be a különböző csapadékszélsőségekben két 18 éves időszak (1979-96, 1997-2014) között. A 6 hüvelyknél nagyobb 24 órás események 317 százalékos növekedését mutatták ki. Mi ugyanezen évekhez képesen 58 százalékos növekedést tapasztaltunk. A 6.4.4. ábra azonban azt mutatja, hogy a gyakoriság 2014 után meredeken csökken, és a következő 5 éves intervallumokban visszatér a hosszú távú átlaghoz, ami ismét illusztrálja a rövid távú trendekből levont következtetések veszélyeit, amikor nagy változások vannak.



6.4.4. ábra: Mint a 6.4.2. ábrán, de a leghevesebb 27 (5 évente 1 alkalommal előforduló) 3 napos csapadékeseményre vonatkozóan 27 északkeleti állomáson New Yorktól ME-ig, beleértve Montrealt is.



6.4.5. ábra: Az 5 évente 1 alkalommal előforduló események során hulló átlagos csapadékmennyiség az északkeleti állomásokon.

A Howarth et al. mintájában tapasztalt magas százalékos növekedés viszonylag kevés helyszínen kis számokkal jár együtt: 58 állomáson az első időszakban mindössze 6, a másodikban pedig 25 eset történt. A legtöbb állomás nem regisztrált ilyen eseményt. Ha régiószerte növekedés tapasztalható a heves eseményekben, akkor annak az összes állomás átlagában látszania kell. A 6.4.5. ábra az ÉK-i 1:5 évente előforduló események átlagos csapadékmennyiségét mutatja. A tendencia mindössze +0,04 hüvelyk/évtized. A legmagasabb mennyiség, 1935-39, magában foglalja az 1938-as Nagy Új-Angliai Hurrikánt, amely egyike volt a régiót sújtó ritka jelentős (3-as vagy magasabb kategóriájú) hurrikánoknak. A 6.4.4. és 6.4.5. ábrákon látható eredmények tehát arra utalnak, hogy

bár az 1995 és 2014 közötti időszakban néhány helyszínen megugrott az események száma, a minta, nem volt regionális, és a változás 2014 után nem maradt fenn.

Jong et al. (2024) az északkeleti régió csapadékeseményeiben 1959 óta a trópusi hatások növekedését dokumentálja, és arra a következtetésre jutott, hogy „az őszi szélsőséges csapadéktrend az USA északkeleti részén az 1990-es évek óta elsősorban a trópusi ciklonokhoz kapcsolódó eseményeknek tulajdonítható.” A kérdés tehát a következő: „A trópusi rendszer 1997 és 2014 közötti, az északkeleti régiót érintő időbeli csoportosulása az emelkedő üvegházgáz-koncentrációra adott válasz volt-e?” Jong et al. megvizsgálták a CMIP-6 modell eredményeit, amelyek azt sugallják, hogy a 21. században kevesebb ilyen rendszer lesz, de a csapadékesemények intenzitása növekedhet. Ez a feltételezés nem látható a 6.4.5. ábrán, ahol a 135 éves időszak alatt az eseményenkénti mennyiség állandó maradt.

Vannak bizonyítékok arra, hogy a leghevesebb csapadékesemények újraeloszlhatnak a városi infrastruktúra helyi időjárásra gyakorolt hatása miatt (pl. Pielke Sr. et al. 2011, Zhang et al. 2018, Yang et al. 2024). Yang et al. kijelentik: „A kompakt beépítésű városokban a belvároshoz képest nagyobb mértékű a szélsőséges csapadékmennyiség-növekedés tapasztalható, mint a vidéki környezetben, míg a szétszórta beépítésű városokban a szélsőséges csapadékmennyiség-növekedés csökken.” Bár ez egy fontos szempont, az ebben az elemzésben használt konkrét állomásokra gyakorolt hatás ismeretlen, vagy legalábbis nem mutatható ki a 6.4.5. ábrán.

Összefoglalva, egyes amerikai régiókban rövid ideig tartó növekedés tapasztalható a szélsőséges csapadékeseményekben, ami összhangban van a természetes változékonysággal. A hosszú távú, országos történelmi feljegyzések elemzése azonban, amely figyelembe veszi a csapadékatatok autokorrelációs tulajdonságait, nem támasztja alá azt az állítást, hogy a szélsőséges, rövid ideig tartó csapadékesemények gyakoribbak vagy intenzívebbek lennének.

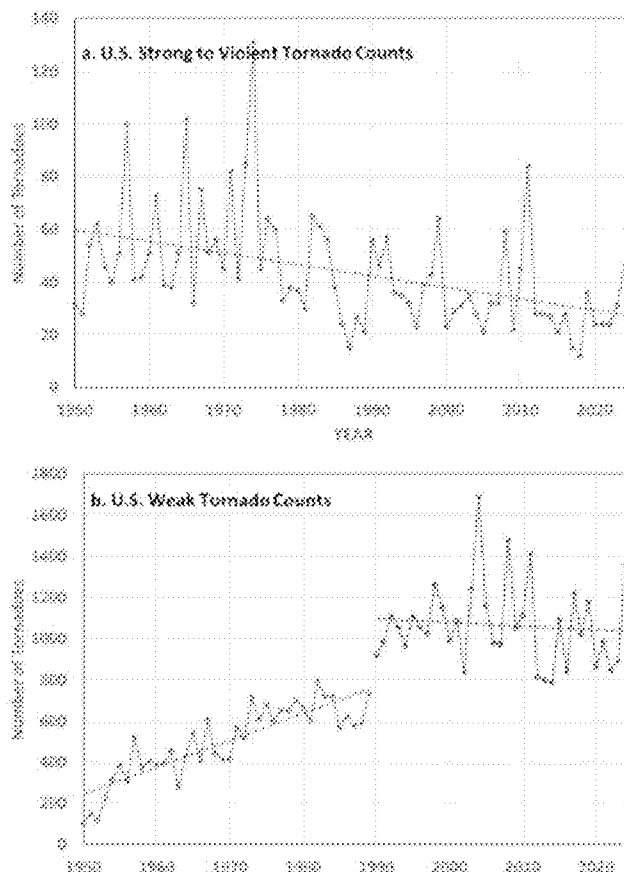
6.5 Tornádók

Az AR6 a következőképpen értékeli a tornádók trendjeit az Egyesült Államokban:

[A] súlyos konvektív viharokhoz kapcsolódó tornádók, jégesők és villámlások megfigyelési trendjei nem észlelhető megbízhatóan a hosszú távú megfigyelések elégtelen lefedettsége miatt. *Közepes megbízhatóságú*, hogy az Egyesült Államokban a tornádók átlagos éves száma viszonylag állandó maradt. (11. fejezet, 11.7.3. szakasz, 1594. oldal)

A gyenge tornádók megfigyelése az idők folyamán megváltozott. A vidéki népesség növekedése és a kézi eszközökkel történő videofelvételkészítés növekvő lehetősége, ahhoz vezetett, hogy gyakrabban tettek jelentést minimális károkat okozó gyenge tornádókról. Ezzel szemben az erős és heves tornádók megfigyelése idővel következetesebb lett. Megjegyzendő, hogy a tornádó erősségét az általa okozott károk alapján mérik, nem pedig a tölcser vizuális megjelenése alapján. A korábbi évtizedekben a korlátozott valós idejű megfigyelési képességek nem akadályozták meg az azonosítást, mivel az erős és heves tornádók sokkal nagyobb károkat okoznak, amelyeket később fognak felmérni, még akkor is, ha magát a tornádót nem figyelték meg. Amióta 1950-ben elkezdődött a statisztika, jelentősen (körülbelül 50%-kal) csökkent az erős és heves tornádók száma, amint azt a 6.5.1a. ábra is mutatja.

Összefoglalva, 1950 óta az Egyesült Államokban a súlyos tornádók száma észrevehetően csökkenő tendenciát mutat. 1990 után az Egyesült Államokban a gyenge tornádók száma nagyjából állandó maradt; az azt megelőző adatok hiányosak a megfigyelés korlátozottsága miatt.



6.5.1. ábra: Az Egyesült Államokban évente előforduló tornádók száma (a) erős és heves tornádók (EF3-tól EF5-ig) és (b) gyenge tornádók (EF0-tól EF2-ig) tekintetében. A NOAA Vihareljelző Központ adatai alapján, amelyek a https://www.spc.noaa.gov/wcm/data/1950-2024_actual_tornadoes.csv címen érhetők el.

6.6 Árvizek

Az árvizekben bekövetkezett változásokat a következőképpen értékelték:

AR6: Globális szinten megfigyelt változások tekintetében az árvizek nagyságrendjére vagy gyakoriságára az SREX *alacsony megbízhatósági szintet* mért. Ezt az értékelést megerősítette az AR5 jelentés is. Az SR15 egyes régiókban az árvízgyakoriság-növekedést és szélsőséges vízhozamot talált, más régiókban viszont csökkenést. . . [A] megfigyelt árvízváltozásokról szóló hidrológiai szakirodalom heterogén, regionális és szubregionális medenceszintekre összpontosít, ami megnehezíti a globális, és néha regionális szintek szerinti szintézist. (11.5. fejezet)

AR6: A hideg régiókban, ahol a felmelegedésre válaszul (nagy megbízhatósági szinten) a a hóolvadás uralja az áramlási rendszert, az árvizek szezonális megváltozása megváltozott. Az elmúlt évtizedek csúcspont elérése trendjeivel kapcsolatos megbízhatóság globális szinten *alacsony*. (11.5. fejezet)

NCA4: Az extrém magas vízhozamértékek trendjei vegyesek az Egyesült Államokban. 200 amerikai vízfolyásmérő elemzése növekvő és csökkenő árvízi nagyságú területeket is mutat, de **nem szolgáltat szilárd bizonyítékot** arra vonatkozóan, hogy ezek a tendenciák emberi hatásoknak lennének tulajdoníthatók (240-241. o.)

Az árvizekben USA-szerre kimutatható trendek hiánya összhangban van a 6.4. szakaszban szereplő megállapítással, amiszert a szélsőséges csapadékmennyiségben nem mutatkozik koherens változás.

6.7 Szárazság

Az aszálytrendek értékelése a következő volt.

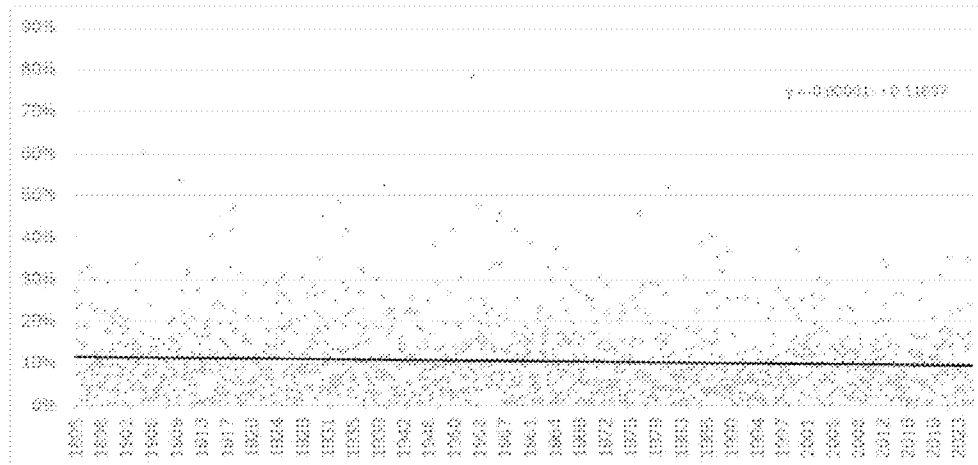
AR6: Kevés AR6 régióban figyeltek meg a meteorológiai aszály növekedését (11.9. szakasz, 1575. o.),

AR6: A mezőgazdasági és ökológiai aszályok növekvő tendenciáit figyelték meg minden kontinensen (*közepes megbízhatóság*), de csak egy AR6 régióban csökkenést (*közepes megbízhatóság*). A hidrológiai aszályok növekvő tendenciáit figyelték meg néhány AR6 régióban. (11. fejezet összefoglalása)

NCA4: A megnövekedett csapadékmennyiség következtében az **aszálystatisztika az egész CONUS-ban csökkent.** (233. o.)

NCA4: A közelmúltbeli aszályok és a kapcsolódó hóhullámok rekordintenzitást értek el az Egyesült Államok egyes régióiban; földrajzi léptékét és időtartamát tekintve azonban az **1930-as évekbeli porvihar-korszak történelmi feljegyzései továbbra is referencia aszályának és szélsőséges hőség eseményének számít** (nagyon magas megbízhatóság). (231. o.)

SREX: A paleoklíma szempontból a közelmúltbeli aszályok nem példa nélküliek, súlyos „megaszárazságokról” számoltak be a paleoklíma-feljegyzésekben Európából, Észak-Amerikából és Ausztráliából. (170. o.)



6.7.1. ábra: A „nagyon száraz” minősítés havi százalékos aránya az USA-ban, 1895–2025. Adatforrás: NOAA <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/uspa/wet-dry/0> , amihez a legkisebb négyzetes trendvonal hozzá lett adva.

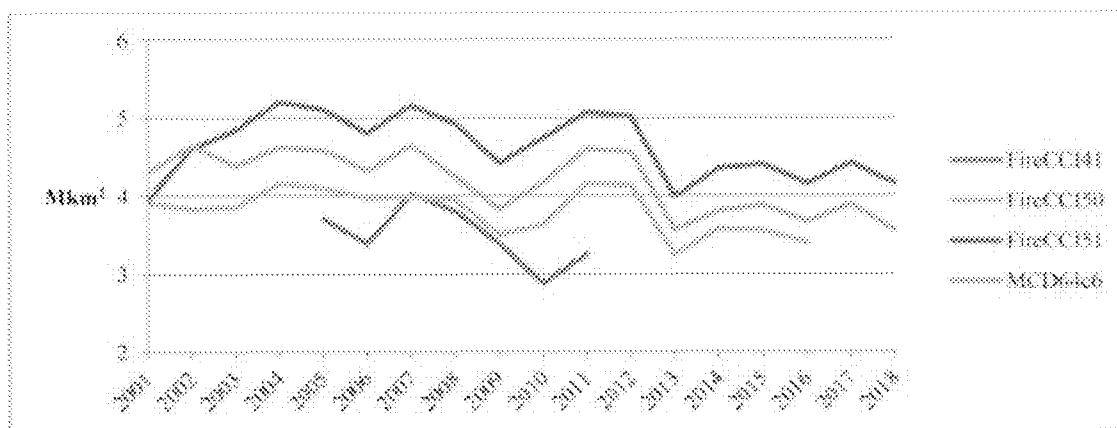
Amint a 6.7.1. ábrán látható, az Egyesült Államok hosszú távú adatai a szélsőséges szárazságban jelentéktelenül csökkenő tendenciát mutatnak (-0,001 százalék évente).

Kogan et al. (2020) egy 38 éves, nagy felbontású, műholdas aszálymérést vizsgált, és arra a következtetésre jut, hogy a globális aszály nem erősödött fel, és nem kapcsolódik az éghajlatváltozáshoz: „határozottan kijelenthető, hogy a globális és a főbb gabonatermelő országok aszályos területeinek és intenzitásának trendjei az 1980-as évek óta nem követik a globális éghajlati felmelegedést.”

Összefoglalva, nincs bizonyíték arra, hogy az elmúlt évtizedekben az Egyesült Államokban vagy globálisan megnövekedett volna a meteorológiai aszályok gyakorisága vagy intenzitása.

6.8 Futótüzek

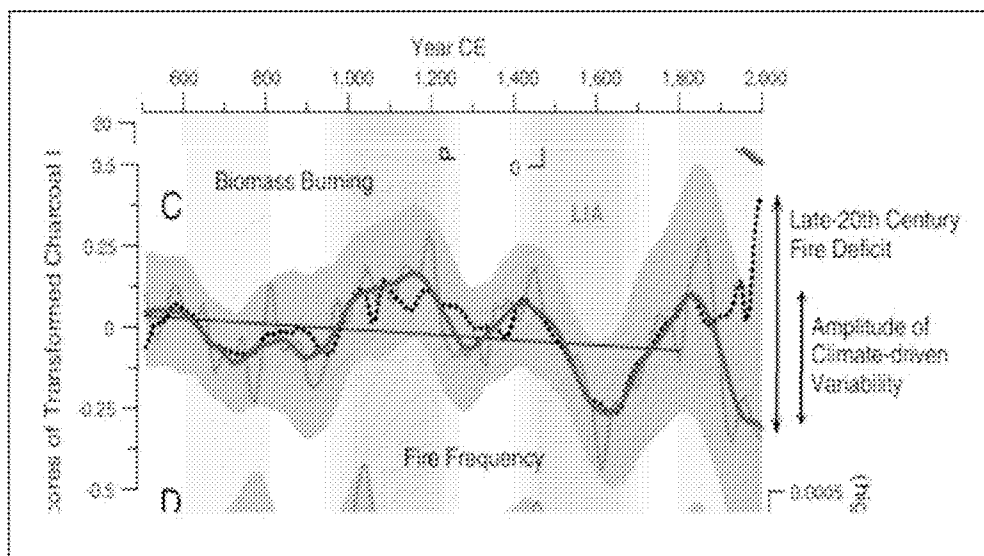
Az IPCC nem adott ki adatelemzést a futótüzek okairól. Amint a 6.8.1. ábra mutatja, az Európai Űrügynökség által mért globális futótűz-aktivitás a 21. században csökkenő tendenciát mutat.



6.8.1. ábra: Globális tűzvészek kiterjedése, 2001–2018. Forrás: Lizundia-Loiola et al. (2021) 12. ábrája alapján. A különféle színű vonalak különféle műholdakból és algoritmusokból származó adattermékeket jelölnek.

A globális adatok azt mutatják, hogy a futótűz-kiterjedtség minden kontinensen állandó vagy csökken (Samborska és Ritchie, 2024). Léteznek azonban bizonyítékok arra, hogy egyes régiókban a tűz-intenzitás rosszabbodik (Cunningham et al. 2024), és hogy a futótüzek 2001 és 2019 között a globális erdőborításban nettó csökkenést okoztak (Tyukavina et al. 2022).

Az Egyesült Államokban 1900-ban elkezdett aktív tűzoltási gyakorlat megnehezíti a futótűz-aktivitás természetes alapértékének meghatározását. A paleoklíma-bizonyítékok azt mutatják, hogy a múltbeli aktivitás sokkal magasabb volt, mint a mai. Marlon et al. (2012) üledékes faszénrétegeket használt az Egyesült Államok nyugati része tűztörténetének rekonstruálására az elmúlt 1400 évben, és emodelt is illesztett a tűzaktivitás éghajlati viszonyok függvényében történő előrejelzésére. Eredményeiket az alábbi 6.8.2. ábra foglalja össze (a cikkük 2. ábrájából). A 20. században egyre nagyobb a futótüzek hiánya. Más szóval, bármennyi tüzet is figyeltek meg a 20. században, az kevesebb volt, mint amit az éghajlati viszonyok alapján az előző évszázadokban megfigyelhettek volna. Parks et al. (2025) hasonlóan állapított meg: az észak-amerikai futótüzek égési területének közelmúltbeli növekedése ellenére a történelmi futótüzek gyakoriságához képest továbbra is jelentős futótűz-hiány áll fenn.

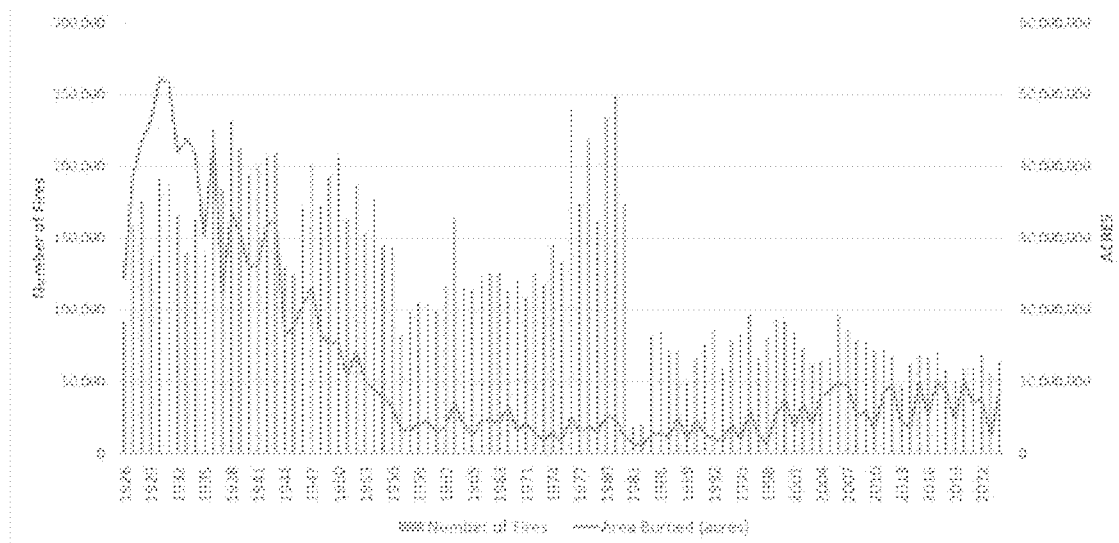


6.8.2. ábra: Tűzgyakoriság és tűzhiány az Egyesült Államokban. A piros vonal a simított faszénrekordot, a fekete szaggatott vonal pedig az éghajlati viszonyok alapján előrejelzett faszénrekordot mutatja. Forrás: Marlon et al. (2012) 2. ábra.

Az amerikai Nemzeti Ügynökségek Közötti Tűzoltóközpont (NIFC) 1926 és 2023 közötti adatait a 6.8.3. ábra mutatja. Az NIFC eltávolította az 1960 előtti adatokat jelenlegi weboldaláról, azzal az indokkal, hogy a mérési módszerek 1960 után megváltoztak, így az összehasonlítás megbízhatatlanná válik. Mindazonáltal, ha csak az 1985 utáni időszakra koncentrálunk, a tüzek száma nem növekszik. A leégett terület valóban nőtt, de csak körülbelül 2007-ig.

Az erdő- és bozóttüzek mindig is részét képezték a természetnek, és minden bizonnyal teremthetnek olyan körülményeket, amelyek rövid távon minden élőlény számára, beleértve az embert is, barátságtalanok. A tudomány megerősítette a futótüzek általános előnyeit és szükségességét. Míg a közelmúltbeli nagy horderejű tüzek és évszakok emlékeztetnek a potenciális pusztító hatásra, a legnagyobb horderejű amerikai futótűz továbbra is az 1910-es ún. nagy robbanás az Egyesült Államok nyugati részén, ami több mint hárommillió hektárt pusztított el, és egész városokat semmisített meg, mint például Taft, MT (Apple, 2020). Az 1910-es tűzvész átalakította az Egyesült Államok Erdészeti Szolgálatát (National Forest Foundation 2022), ami a tűzoltásra helyezte a hangsúlyt, elsődleges célként az összes erdő- és bozóttűz megfékezését tűzve ki (Forest History Society, 2022). Ez vezetett az 1935-ös „10 órás szabályhoz”, amely előírta, hogy minden, bármely napon észlelt tüzet másnap reggel 10 óráig meg kell fékezni (National Forest Foundation, 2022).

Nemes célnak tűnik ugyan mindenféle futótűz elfojtása, felmerültek a kérdések, hogy ez a viselkedés vajon „követi-e a tudományt” (U.S. Forest Service, 2022). Idővel az Egyesült Államok Erdészeti Szolgálat elkezdte újragondolni céljait, felismerve, hogy az olyan új megközelítések, mint az előírt égetések, a tüzelőanyagok kiküszöbölése és az ellenőrzött erdőtüzek megfelelőbbek (Sommer, 2016). A legújabb kutatások igazolják ezt a megközelítést, és elismerik, hogy a gyakoribb kisebb tüzek valószínűleg egészségesebb erdőket, vízi ökoszisztémákat és biológiai sokféleséget eredményeznek (Stephens et al., 2021).



6.8.3. ábra: Az Egyesült Államokbeli erdő- és bozóttüzek száma 1926 és 2023 között. Forrás: 2018 utáni adatok: National InterAgency Fire Center adatok <https://www.nifc.gov/fire-information/statistics/wildfires>. 2017 előtti adatok: webarchive.org (dátum nélkül)

Hivatkozások

- Apple, C. (2020, January 21). 1910 fire – The big burn across Montana and Idaho. The Spokesman-Review. <https://www.spokesman.com/stories/2020/jan/19/1910-fire-big-burn-across-montana-and-idaho/>
- Bell, Gerald D. and Muthuvel Chelliah, “Leading Tropical Modes Associated with Interannual and Multidecadal Fluctuations in North Atlantic Hurricane Activity,” *Journal of Climate* 19, no. 4 (February 15, 2006): 590–612, <https://doi.org/10.1175/JCLI3659.1>.
- Brewer, W. H. (1930). *Up and down California in 1860–1864: The journal of William H. Brewer*. University of California Press.
- Christy, J. R., Norris, W. B., and McNider, R. T. (2009). Surface temperature variations in East Africa and possible causes. *Journal of Climate*, 22(12), 3342–3356. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2726.1>
- Cohn, T. A. and Lins, H. F. (2005). Nature’s style: Naturally trendy. *Geophysical Research Letters*, 32(23). <https://doi.org/10.1029/2005GL024476>
- Colorado State University. (2025). Realtime tropical cyclone guidance. <https://tropical.atmos.colostate.edu/Realtime/index.php>
- Cunningham, C.X., G.J. Williamson, and D. Bowman (2024) Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth. *Nature Ecology and Evolution* 8, 1420–1425. <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02452-2>
- Forest History Society (2022). The 1910 fires. <https://foresthistory.org/research-explore/us-forest-service-history/policy-and-law/fire-u-s-forest-service/famous-fires/the-1910-fires/>
- Gershunov, A., and K. Guirguis (2012). California heat waves in the present and future. *Geophysical Research Letters*, 39(18). <https://doi.org/10.1029/2012GL052979>
- Gershunov, A., T. Shulgina, F.M. Ralph, D.A. Lavers J.J. and Rutz (2017). Assessing the climate-scale variability of atmospheric rivers affecting western North America. *Geophysical Research Letters*, 44(15), 7900–7908. <https://doi.org/10.1002/2017GL074175>
- Goldenberg, Stanley et al., “The Recent Increase in Atlantic Hurricane Activity: Causes and Implications,” *Science* 293, no. 5529 (July 20, 2001): 474–479, <https://doi.org/10.1126/science.1060040>.
- Howarth, M. E., C.D. Thorncroft, and L.F. Bosart (2019). Changes in extreme precipitation in the Northeast United States: 1979–2014. *Journal of Hydrometeorology*, 20(4), 673–689. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0155.1>
- Hurst, H. E. (1951). Long term storage capacities of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116, 776–808.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (V. Masson-Delmotte et al., Eds.). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Jong, B.-T., H. Murakami, T.L. Delworth and W.F. Cooke (2024). Contributions of tropical cyclones and atmospheric rivers to extreme precipitation trends over the Northeast US. *Earth's Future*, 12, e2023EF004370. <https://doi.org/10.1029/2023EF004370>
- Karl, T.R., H.F. Diaz, and G. Kukla. (1988): Urbanization: Its detection and effect on the United States climate record. *Journal of Climate*, 1, 1099-1123 https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/1/11/1520-0442_1988_001_1099_uidaei_2_0_co_2.xml
- Karl, T. R., C.N. Williams Jr., F.T. Quinlan, and T.A. Boden (1990). United States Historical Climatology Network (HCN) serial temperature and precipitation data (Publication No. 3404). Oak Ridge National Laboratory.
- Klotzbach, Phil et al. (2018) Continental U.S. Hurricane Landfall Frequency and Associated Damage: Observations and Future Risks, *Bulletin of the American Meteorological Society* 99, no. 7 (July 2018): 1359–1376, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0184.1>.
- Kogan, Feliz, Wei Guob and Wenze Yang (2020) “Near 40-year drought trend during 1981-2019 earth warming and food security” *Geomatics, Natural Hazards and Risk* Vol 11(1)
- Koutsoyiannis, D. (2013) *Hydrology and Change*. *Hydrological Sciences Journal* 58(6) <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.804626>
- Lizundia-Loiola, J., et al. (2020) A spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data. *Remote Sensing of the Environment* 236, 111493, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111493>
- Markonis, Y., and D. Koutsoyiannis (2016). Scale-dependence of persistence in precipitation records. *Nature Climate Change*, 6, 399–401. <https://doi.org/10.1038/nclimate2894>
- Marlon, Jennifer, Patrick J Bartlein, Daniel G. Gavin et al. (2012) Long-term perspective on wildfires in the western USA *Proceedings of the National Academy of Sciences* February 14 2012 <https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.1112839109>
- Maue, R. N. (2025). *Climatlas: Tropical cyclones*. <https://climatlas.com/tropical/>
- Maue, R. N. (2011) Recent historically low tropical cyclone activity. *Geophysical Research Letters* 38, L14803, doi:10.1029/2011GL047711
- McKittrick, R., and J.R. Christy (2019). Assessing changes in US regional precipitation on multiple time scales. *Journal of Hydrology*, 578, 124074. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124074>
- McKittrick, R. and J.R. Christy (2025), “Data and Code for CWG2025 Report”, Mendeley Data, V1, doi: 10.17632/by76s7rxfb.1
- McNider, R.T., G.J. Steeneveld, A.A.M. Holtslag, R.A. Pielke Sr., S. Mackaro, A. Pour-Biazar, J. Walters, U. Nair, and J.R. Christy, 2012: Response and sensitivity of the nocturnal boundary layer over land to added longwave radiative forcing. *Journal of Geophysical Research*, 117, D14106, doi:10.1029/2012JD017578.
- Null, J. and J. Hulbert, “California Washed Away: The Great Flood of 1862,” *Weatherwise* 60, no. 1 (2007): 26–30, <https://doi.org/10.3200/wewi.60.1.26-30>
- National Forest Foundation. (2022). Blazing battles: The 1910 fire and its legacy. <https://www.nationalforests.org/our-forests/your-national-forests-magazine/blazing-battles-the-1910-fire-and-its-legacy>
- National Interagency Fire Center. (2024). Wildfire statistics. <https://www.nifc.gov/fire-information/statistics/wildfires>
- NCA4. (2017). Climate science special report: Fourth National Climate Assessment, Volume I (D. J. Wuebbles, D. W. Fahey, and K. A. Hibbard, Eds.). U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/J0J964J6>
- NCA5. (2023). Fifth National Climate Assessment (A. R. Crimmins et al., Eds.). U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/NCA5.2023.CH1> (accessed May 22, 2025)
- NOAA Hurricane Research Division. (2025a). All U.S. hurricanes (1851–2019). https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/All_U.S._Hurricanes.html

- NOAA Hurricane Research Division. (2025b). Most intense (3, 4, 5) continental United States hurricanes: 1851–1970, and 1983–2023. https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/most_intense.html
- Overland, J. E. (2021). Causes of the record-breaking Pacific Northwest heatwave, late June 2021. *Atmosphere*, 12(11), 1434. <https://doi.org/10.3390/atmos12111434>
- Pan, M., M. Lu and U. Lall (2024). Diversity of cross-Pacific atmospheric river main routes. *Communications Earth and Environment*, 5, 378. <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01552-y>
- Parks, Sean, Christopher Guiterman, Ellis Margolis et al. (2025) A fire deficit persists across diverse North American forests despite recent increases in area burned. *Nature Communications* 16 <https://www.nature.com/articles/s41467-025-56333-8>
- Pielke, R. A., et al. (2011). Land use/land cover changes and climate: Modeling analysis and observational evidence. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2, 828–850. <https://doi.org/10.1002/wcc.144>
- Porter, K., et al. (2011). Overview of the ARkStorm scenario. U.S. Geological Survey.
- Quinlan, F. T., T. R. Karl, and C.N. Williams Jr. (1987). United States Historical Climatology Network (USHCN) serial temperature and precipitation data (NDP-019). Oak Ridge National Laboratory.
- Runnalls, K.E. and T.R. Oke, 2006: Technique to detect microclimate inhomogeneities in historical records of screen-level air temperature. *Journal of Climate*, 19, 959–978. <https://doi.org/10.1175/JCLI3663.1>
- Samborska, V., and H. Ritchie (2024). Wildfires. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/wildfires>
- Seneviratne, S. et al. (2021) “Chapter 11: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate.” In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, et al., 1513–1766. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>.
- Sommer, L. (2016, November 7). Let it burn: The Forest Service wants to stop putting out some fires. KQED. <https://www.kqed.org/science/1134217/let-it-burn-the-forest-service-wants-to-stop-putting-out-some-fires>
- Stephens, Scott et al., (2021) “Fire, Water, and Biodiversity in the Sierra Nevada: A Possible Triple Win,” *Environmental Research Communications* 3, no. 8 (August 6, 2021): p. 081004, <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac17e2>.
- Tyukavina Alexandra , Peter Potapov, Matthew Hansen et al. (2022) Global Trends of Forest Loss Due to Fire From 2001 to 2019, *Frontiers in Remote Sensing*. Volume 3 <https://www.frontiersin.org/journals/remote-sensing/articles/10.3389/frsen.2022.825190/full>
- U.S. Forest Service. (2022). Managing fire. <https://www.fs.usda.gov/science-technology/fire>
- USGCRP. (2023). USGCRP indicators platform: Heat waves. <https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves>
- Vecchi, Gabriel A. and Thomas R. Knutson (2011) “Estimating Annual Numbers of Atlantic Hurricanes Missing from the HURDAT Database (1878–1965) Using Ship Track Density,” *Journal of Climate* 24, no. 6 (2011): 1736–1746, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3810.1>.
- Villarini, Gabriele, Gabriel A. Vecchi, and James A. Smith, “U.S. Landfalling and North Atlantic Hurricanes: Statistical Modeling of Their Frequencies and Ratios,” *Monthly Weather Review* 140, no. 1 (January 2012): 44–65, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00063.1>.
- Web Archive. (n.d.). Archive of NIFC fire data. https://web.archive.org/web/20200212033452/https://www.nifc.gov/fireInfo/fireInfo_stats_totalFires.html
- Yang, L., Y. Yang, Y. Shen, et al. (2024). Urban development pattern’s influence on extreme rainfall occurrences. *Nature Communications*, 15, 3997. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48533-5>
- Zhang, W., G. Villarini, G.A. Vecchi, and J.A. Smith, J. A. (2018). Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by Hurricane Harvey in Houston. *Nature*, 563, 384–388. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0676-z>

7 TENGERSZINTVÁLTOZÁSOK

Fejezet-összefoglaló

1900 óta az átlagos tengerszint globálisan körülbelül 8 hüvelykkel (kb. 20 cm-rel) emelkedett. Az Egyesült Államok partjai mentén a tengerszintváltozás rendkívül változó: összefüggésben áll a süllyedésre vezető folyamatok helyi váltoásaival, valamint az óceáni áramlási mintázatokkal. Az Egyesült Államok partjainál a legnagyobb mértékű tengerszint-emelkedés Galveston, New Orleans és a Chesapeake-öböl régióiban figyelhető meg – e helyek mindegyikén jelentős helyi szárazföldi süllyedés (süppedés) tapasztalható, ami az éghajlatváltozással nincs összefüggésben.

A globális tengerszint-emelkedés szélsőséges előrejelzései egy valószínűtlen, szélsőséges kibocsátási forgatókönyvből, valamint egy jégtakaró-instabilitást feltételező folyamat félreértéséből erednek. Az AR6 2050-re vonatkozó előrejelzéseinek értékelése idején (az 1995–2014 közötti időszakra vonatkoztatva) 2025-re az időszak közel fele eltelt, a tengerszint pedig az előre jelzettől lassabb ütemben emelkedik. Az Egyesült Államok mareográfjainak (partmenti tengerszint-mérőinek) mérési adatai nem mutatnak a tengerszint-emelkedés történelmi üteménél nagyobb gyorsulást.

7.1 Globális tengerszint-emelkedés

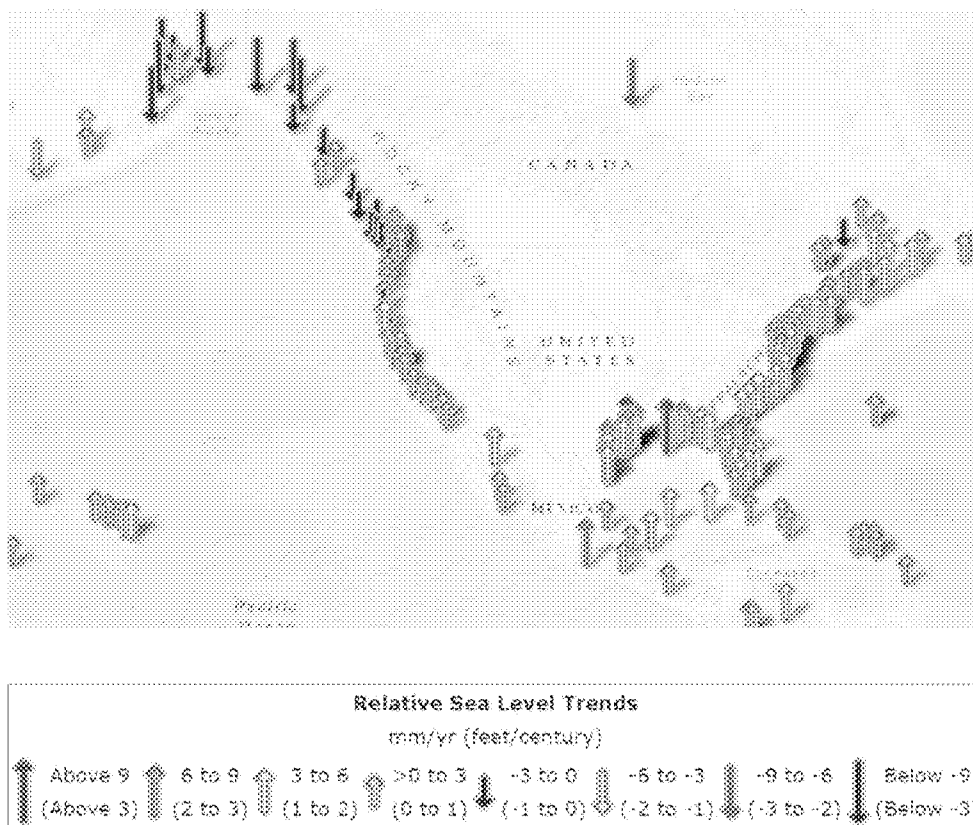
A globális tengerszint-emelkedés vitathatatlanul a legfontosabb éghajlati hatásmechanizmus, amely egyértelműen összefügg a hőmérséklet emelkedésével. Globális szinten a felmelegedés a tengervíz hőtágulása, valamint a gleccserek és jégtakarók olvadása révén emeli a tengerszintet. A szárazföldi víztárolás változásai egy másik fontos tényezőt jelentenek. Regionális szinten a tengerszint változását a nagymértékű óceáni cirkulációs mintázatok, valamint a jég és a víz újraeloszlásából eredő geológiai folyamatok és deformációk befolyásolják. Lokálisan a geológiai folyamatokból, a talajvíz-kivonásból és a fosszilis tüzelőanyagok kitermeléséből eredő függőleges szárazföldi mozgás is fontos.

Az AR6 becslése szerint a globális átlagos tengerszint 1901 és 2018 között 7,9 (5,9–9,8) hüvelykkel emelkedett, és a tengerszint-emelkedés üteme az elmúlt évtizedekben gyorsult. Az óceáni medence szintjén az 1993–2018 közötti időszakban a tengerszint a Csendes-óceán nyugati részén emelkedett a leggyorsabban, a Csendes-óceán keleti részén pedig a leglassabban (Fox-Kemper et al., 2021). A globális tengerszint-emelkedés ütemét évi 0,12 hüvelykre becsülik, ami körülbelül két egymásra rakott egypenny-s érme magasságának felel meg (NASA, 2020).

A globális tengerszint-emelkedés megfigyelőrendszerei jelentősen fejlődtek a műholdas korszakban, különösen a műholdas magasságmérők 1993-as megjelenésével. A helyi partmenti tengerszintmérők (mareográfok) hasznos adatokat szolgáltatnak az elmúlt évszázadra, sőt néhány helyszín esetében még hosszabb időre visszamenően is. A Kis Jégkorszak tizenkilencedik század közepi végetérését követően a tengerszintmérők azt mutatják, hogy a globális átlagos tengerszint az 1820–1860 közötti időszakban kezdett emelkedni, jóval a antropogén üvegházgáz-kibocsátás meglődulása előtt.

7.2 Az USA tengerszint-emelkedése

A globális átlagos tengerszint-emelkedés megfigyelt és előrejelzett ütemének helyi folyamatok miatt bizonyos helyszíneken kevés klimatológiai jelentősége lehet (NOAA, 2025). A 7.1. ábra azt mutatja, hogy Kanadában és Alaszkában (valamint Washington északi részén) a tengerszint a glaciális felpattanásból eredő emelkedés miatt csökken. A csendes-óceáni partvidék tengerszint-mérőinek többsége alacsony tengerszint-emelkedési ütemet mutat, míg az Egyesült Államokban a legnagyobb értékek a Mexikói-öböl partján (Louisiana és Texas), valamint az Atlanti-óceán középső részén fekvő államokban (a Chesapeake-öböl régiójában) figyelhetők meg.



7.1. ábra: Az Egyesült Államok partvidékének relatív tengerszint-emelkedési ütemét ábrázoló térkép (NOAA, <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/>). Referenciaként 3 mm = 0,12 hüvelyk.

A mareográfok által mért relatív tengerszint-emelkedés összemosza a tengervíz térfogatának éghajlati szempontból releváns növekedését a lokális függőleges szárazföldi mozgással. Ez utóbbit, amely helyenként változik, a legjobban egy, a mareográf közelében elhelyezett GPS-állomással lehet mérni. A szárazföldi mozgást számos folyamat vezérli, és hatásuk összehasonlíthatók az éghajlati jellel, és lokálisan súlyosbíthatják (süllyedés/süppedés esetén) vagy enyhíthetik (emelkedés esetén) a tengerszint-emelkedés kockázatát (Wöppelmann és Marcos, 2016). A süllyedést kiváltó emberi tevékenységek gyakran jelentősek. Ilyen például a talajvíz elvezetése (pl. városfejlesztés céljából) és a talajvíz vagy a szénhidrogén felszín alóli kitermelése.

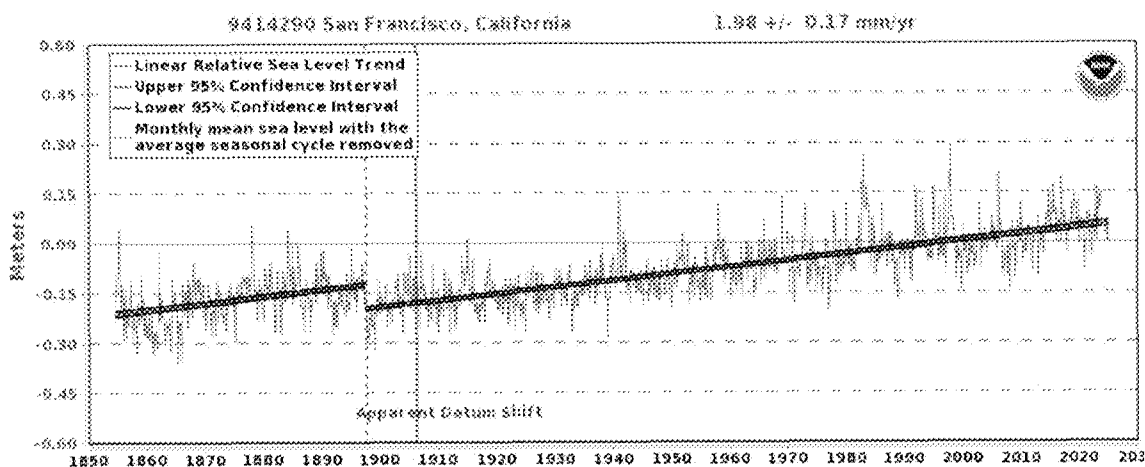
A 7.1. táblázat az abszolút tengerszint-emelkedést (ASLR) mutatja olyan kiválasztott helyszíneken, amelyeket a korrigálatlan relatív tengerszint-emelkedés (RSLR) összegéből - mareográf idősorokból (NOAA, 2025) és a függőleges szárazföldi mozgás (VLM) méréseiből (NAS, 2012; Letetrel et al., 2015; Karegar et al., 2016) becsülve. – határoztak meg. Ezen helyszínek mindegyikén az abszolút tengerszint-emelkedés a helyi süllyedés miatt lényegesen kisebb, mint a mért relatív tengerszint-emelkedés. A mért relatív tengerszint-emelkedés több mint fele e helyszíneken a szárazföld süllyedésének tulajdonítható: San Francisco, Galveston, Grand Isle. Összehasonlításképpen, az abszolút tengerszint-emelkedés globális átlagos mértéke becslések szerint 0,12 hüvelyk/év.

Location	RSLR	VLM	ASLR
San Francisco, CA	+0.08	-0.06	+0.02
Galveston, TX	+0.26	-0.19	+0.07
Grand Isle, LA	+0.36	-0.28	+0.08
St Petersburg, FL	+0.12	-0.02	+0.10
New York City, NY	+0.11	-0.05	+0.06

7.1. táblázat: Abszolút tengerszint-emelkedés (hüvelyk/év, ASLR), amely a relatív tengerszint-emelkedésből (RSLR) és a függőleges szárazföldi mozgásból (VLM) tevődik össze.

San Francisco-öböl

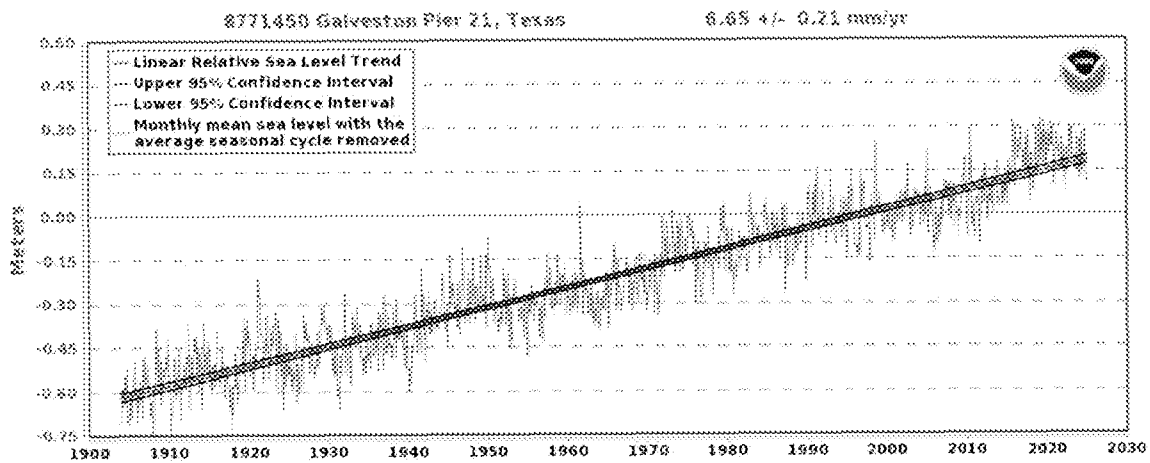
A legutóbbi évszázad során a San Francisco-öböl térségében a relatív tengerszint 7,8 hüvelykkel emelkedett, átlagosan 0,08 hüvelyk/év sebességgel (7.2. ábra). Amint a 7.1. táblázat mutatja, San Francisco függőleges szárazföldi mozgása -0,06 hüvelyk/év (süllyedés), ami a közelmúltbeli abszolút sebességet +0,02 hüvelyk/évnek adja ki. A Treasure Island, a San Francisco-i Nemzetközi Repülőtér és Foster City egyes részei akár 0,4 hüvelyk/év sebességgel is süllyednek (Shirzaei és Bürgmann, 2018). A San Francisco-öböl térségében felmerülő problémákat, beleértve a repülőteret fenyegető veszélyeket is, elsősorban a korábban vizes élőhelyekként szolgáló hulladéklerakó övezetekben fellépő talajtömörödés okozza, nem pedig a globális tengerszint-emelkedés lassú kúszása.



7.2. ábra: Mareográf-mérések San Franciscóban, Kaliforniában, a NOAA-tól neszerezve - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=9414290 (letöltve: 2025.04.22.).

Galveston - Houston

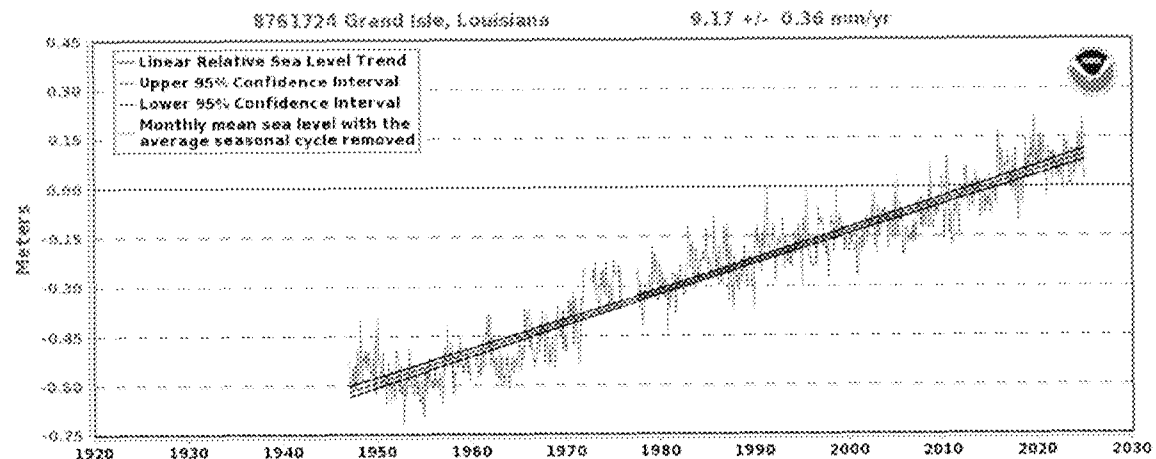
A Galveston 21-es mólónál végzett hosszú távú partmeni tengerszint-mérések (mareográf-mérések) az elmúlt évszázadban 2,18 láb tengerszint-emelkedést mutatnak, ami 0,26 hüvelyk/év sebességet jelent (7.3. ábra). A függőleges szárazföldi mozgás (süllyedés) Galvestonban -0,19 hüvelyk/évre becsülhető, ami az abszolút emelkedési sebességére +0,07 hüvelyk/év értéket ad ki (7.1. táblázat). Az Egyesült Államok Földtani Szolgálat (USGS) megállapította, hogy a Houston-Galveston régióban a szárazföldi süllyedés nagy része a talajvíz-kivonás közvetlen következménye (Kasmarek és Ramage 2017), ami a víztartó réteg üledékeinek tömörödését okozta, főként a finomszemcsés iszap- és agyagrétegekben. 1979-re Houstonban csaknem 10 lábnyi süllyedés következett be.



7.3. ábra: Mareográf-mérések a Galveston Pier-nél, Texasban, a NOAA-tól beszerezve - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8771450 (letöltve: 2025.04.22.).

New Orleans és a Mississippi-delta

A louisianai Grand Isle-ben végzett hosszú távú mareográf-mérések azt mutatják, hogy a tengerszint az elmúlt 100 évben valamivel több, mint 3 lábbal emelkedett, átlagosan 0,36 hüvelyk/év sebességgel (7.4. ábra). A függőleges szárazföldi mozgás (süllyedés) becslések szerint -0,28 hüvelyk/év. A 7.1. táblázat az abszolút tengerszint-emelkedést +0,08 hüvelyk/évnek adja meg.

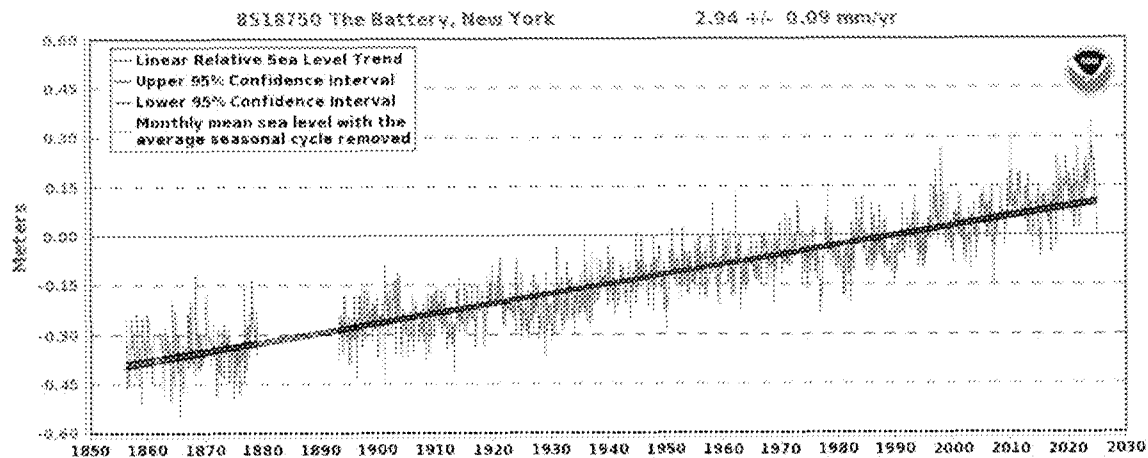


7.4. ábra: Mareográf-mérések Grand Isle-ben, Louisianában, a NOAA-tól beszerezve - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8761724 (letöltve: 2025.04.22.).

A Mississippi-delta régióban a tengerszint emelkedésének és a földveszteségnek a problémái összetettek. A fő okok: geológiai süllyedés és a Mississippi folyó által szállított üledék mennyiségének csökkenése. Az 1950-es évek óta a medencében épült gátak körülbelül 50 százalékkal csökkentették a Mississippi lebegő üledékterhelését (Maloney 2018). Louisiana partvidékének új süllyedési térképe szerint a part menti régió évente körülbelül 30 centiméterrel süllyed (Neinhuis et al. 2017), ami a talajvíz és az erőforrások kimerülésével jár. Mivel a város átlagos tengerszint feletti magassága 30-60 centiméterrel a tengerszint *alatt* van, az antropogén felmelegedésből eredő tengerszint-emelkedés aligha tekinthető a New Orleans-i problémák fő okának.

New York City

New York City különösen ki van téve a tengerszint-emelkedés hatásainak, mivel elsősorban szigeteken épült, és 830 kilométer hosszú partvonallal rendelkezik. Manhattan déli csücskében (The Battery) végzett mareográf-mérések azt mutatják, hogy a relatív tengerszint az elmúlt évszázadban több mint 28 cm-rel emelkedett, átlagosan 0,38 cm/év sebességgel (7.5. ábra). New York City területén azonban a függőleges szárazföldi mozgás -0,05 cm/év (nagyjából 12 cm/év), így a tengerszint abszolút emelkedésének mértéke a The Battery-nél 0,06 cm/év, ami a mért relatív tengerszint-emelkedés körülbelül 55 százaléka.



7.5. ábra: Mareográf-mérések The Battery-nél, New York államban; az adatok a NOAA-tól származnak - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8518750 (letöltve: 2025.04.22.).

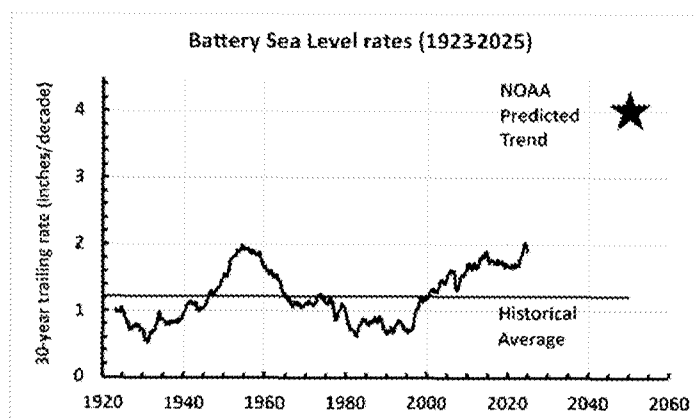
7.3 A várható tengerszint-emelkedés

A tengerszint-emelkedéssel kapcsolatos aggodalom nem az 1900 óta bekövetkezett nagyjából 20 centiméteres globális emelkedés miatt van. Hanem inkább a 21. századon át tartó melegedő éghajlat szimulációin alapuló gyorsuló emelkedésre vonatkozó előrejelzések miatt.

Az AR6 *nagyfokú* egvezést talált a 2050-re vonatkozó, publikált globális átlagos tengerszint-előrejelzések között, amelyek a kibocsátási forgatókönyvekre mindannyian alig érzékenyek. Csak azokat az előrejelzéseket figyelembe véve, amelyek a jégtakaró folyamatait is figyelembe veszik, és amelyek számszerűsítésében legalább *közepes megbízhatóság* van, a 2050-re vonatkozó globális tengerszint-előrejelzés az összes kibocsátási forgatókönyv szerint 3,94 és 49,9 cm közé esik (5–95. percentilis nagyon valószínű tartomány) az 1995–2014-es alapidőszakhoz képest (Fox-Kemper et al., 2021).

Ezzel szemben az AR6 kijelenti, hogy a 2100-ra vonatkozó, publikált globális átlagos tengerszint-előrejelzések között *kiemértékű az egyezés*, különösen a magasabb kibocsátási forgatókönyvek esetében. Ha csak azokat a jégtaaró-folyamatokat reprezentáló előrejelzéseket vesszük figyelembe, amelyek számszerűsítésében legalább *közepes megbízhatóság* áll fenn, az AR6 globális átlagos tengerszint-előrejelzése 2100-ra 7,9 és 39,4 hüvelyk között van (az 5–95. percentilis nagyon valószínű tartomány) az SSP2–4,5 közepes kibocsátási forgatókönyv szerint (Fox-Kemper et al., 2021). A 2100-ig előretékintő tengerszint-emelkedésre vonatkozó előrejelzéseket nagy bizonytalanság övezi a jégtaaró instabilitásának bizonytalansága miatt, különösen a magasabb kibocsátási forgatókönyvek esetében.

2022 februárjában a NOAA közzétette az Egyesült Államok különféle partmenti helyeire vonatkozó tengerszint-emelkedési előrejelzéseit (Sweet et al., 2022). Azt állítják, hogy 2050-re a tengerszint 30 centiméterrel fog emelkedni a manhattani The Battery-nél (2020-hoz képest). Egy 30 centiméteres emelkedés harminc év alatt több mint kétszerese lenne a jelenlegi ütemnek, és körülbelül háromszorosa az elmúlt évszázad átlagos ütemének. Ebben a történelmi kontextusban a NOAA előrejelzése figyelemre méltó – ahogy a 7.6. ábra mutatja, drámai gyorsulást igényelne, amely a 20. század eleje óta megfigyelt összes ütemtrendet meghaladja. De még ennél is figyelemreméltóbb, hogy Sweet et al. (2022) szerint ez az emelkedés „kész tény – a jövőbeli kibocsátásoktól függetlenül meg fog történni. Egy évtized múlva kiderül, hogy ennek az előrejelzésnek van-e alapja.



7.6. ábra: A tengerszint-emelkedés üteme a manhattani The Battery-nél. Az ábrán a harmincéves történelmi trend látható, valamint a NOAA által állítóláagosan „kész tény”, a 2050-ig jelzett trend. Történelmi adatok: NOAA Tides and Current.

Hivatkozások

- Fox-Kemper, B., Hewitt, H. T., Xiao, C., Adalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S. S., Edwards, T. L., ... & Yu, Y. (2021). Ocean, cryosphere and sea level change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1211–1362). Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Karegar, M. A., Dixon, T. H., & Engelhart, S. E. (2016). Subsidence along the Atlantic Coast of North America: Insights from GPS and late Holocene relative sea level data. *Geophysical Research Letters*, 43(7), 3126–3133. <https://doi.org/10.1002/2016GL068015>
- Kasmarek, M. C., & Ramage, J. K. (2017). Water-level altitudes 2017 and water-level changes in the Chicot, Evangeline, and Jasper aquifers and compaction 1973–2016 in the Chicot and Evangeline aquifers, Houston-Galveston Region, Texas (Scientific Investigations Report 2017–5080). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/sir20175080>

- Letetrel, C., Becker, M., Llovel, W., & Cazenave, A. (2015). Estimation of vertical land movement rates along the coasts of the Gulf of Mexico over the past decades. *Continental Shelf Research*, 111(Part A), 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.10.018>
- Maloney, J. M., Bentley, S. J., Xu, K., Obelcz, J., Georgiou, I. Y., & Miner, M. D. (2018). Mississippi River subaqueous delta is entering a stage of retrogradation. *Marine Geology*, 400, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.03.001>
- National Academy of Science (NAS, 2012). Sea-level rise for the coasts of California, Oregon and Washington: Past, present, and future. Appendix A: Vertical land motion and sea-level data along the West Coast of the United States. National Academies Press. <https://nap.nationalacademies.org/catalog/13389/sea-level-rise-for-the-coasts-of-california-oregon-and-washington>
- NASA. (2020). NASA sea level rise portal: 2020 edition. <https://www.nasa.gov/specials/sea-level-rise-2020/>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Center for Operational Oceanographic Products and Services. (n.d.). Sea level trends. <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/>
- NOAA Tides & Currents. (n.d.). Relative sea level trends. <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/>
- Nienhuis, J. H., Törnqvist, T. E., Esposito, C. R., Liang, M., & Ma, H. (2017). A new subsidence map for coastal Louisiana. *GSA Today*, 27(6), 28–29. <https://doi.org/10.1130/GSATG337GW.1>
- Shirzaei, M., & Bürgmann, R. (2018). Global climate change and local land subsidence exacerbate inundation risk to the San Francisco Bay Area. *Science Advances*, 4(3), eaap9234. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aap9234>
- Sweet, W. V., Hamlington, B. D., Kopp, R. E., et al. (2022). Global and regional sea level rise scenarios for the United States (USGS Report 70229139). United States Geological Survey. <https://www.usgs.gov/publications/global-and-regional-sea-level-rise-scenarios-united-states>
- Wöppelmann, G., & Marcos, M. (2016). Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. *Reviews of Geophysics*, 54, 64–92. <https://doi.org/10.1002/2015RG000502>

8 BIZONYTALANSÁGOK A KLÍMAVÁLTOZÁS HATÁSÁNAK MEGHATÁROZÁSÁBAN

Fejezet-összefoglaló

Az attribúció (egy ok hozzárendelése valamely jelenséghez, „oktulajdonítás”) az éghajlatváltozás valamely megnyilvánulása okának, mindenekelőtt az antropogén tevékenységnek a beazonosítására utal. Az attribúciós módszerekről folyamatos tudományos vita zajlik, különösen a szélsőséges időjárási események vonatkozásában. Az okok beazonosítását megnehezíti a nagy természetes változékonyság, a várható antropogén jel viszonylag kis értéke, a jó minőségű adatok hiánya és a hiányos éghajlati modellekre való támaszkodás. Az IPCC régóta figyelmeztet arra, hogy az éghajlattudományban az oksági összefüggések megállapítására szolgáló módszerek eredendően bizonytalanok, és az oktulajdonítás végső soron a szakértői megítéléstől függ.

Az IPCC a CO₂ közelmúltbeli felmelegedésben betöltött szerepéről szóló főbb értékeléseinek lényegi kritikája a természetes éghajlati változékonyság nem megfelelő értékelését, a napenergia-változékonyság és az aeroszol-kényszer mérési bizonytalanságait, valamint az attribúcióhoz használt statisztikai módszerek problémáit teszi szóvá.

A szélsőséges eseményekhez kapcsolódó legtöbb éghajlati hatást kiváltó tényezőkkel kapcsolatosan az IPCC nem tesz attribúciós (oktulajdonítási) állításokat. A globális szélsőségek statisztikáival kapcsolatos állítások (pl. események valószínűsége vagy visszatérési ideje, nagysága és gyakorisága) az adatok korlátozott volta miatt általában nem tekinthetők pontosnak, és ezeket gyenge megbízhatósággal szerepeltetik. Az egyes szélsőséges időjárási események attribúciója (oktulajdonítása) az esemény ritkasága miatt ébreszt kételyt. A 2021-es északnyugat-amerikai hóhullám okaival kapcsolatos ellentmondásos állítások jól mutatják az egyes szélsőséges eseményekkel kapcsolatos elhamarkodott oktulajdonítási állítások buktatóit.

8.1 Bevezetés

Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC) különbséget tesz az éghajlatváltozás észlelése és az éghajlatváltozás attribúciója (okának hozzárendelése, oktulajdonítása) között. Az AR6 WGI szöveget (IPCC, 2025) meghatározása szerint:

Észlelés: A változás észlelése az a folyamat, amelynek során kimutatjuk, hogy az éghajlat vagy az éghajlat által érintett rendszer valamilyen meghatározott statisztikai értelemben megváltozott, anélkül, hogy megadnánk a változás okát. Egy beazonosított változás akkor mutatkozik meg a megfigyelésekben, ha a véletlenszerű, pusztán a belső változékonyság miatti bekövetkezés valószínűsége kicsin, például <10%.

Attribúció: Az attribúció az a folyamat, amelynek során több ok-okozati tényező relatív hozzájárulását hozzárendeljük valamely változáshoz vagy eseményhez, a megbízhatóság formális értékelésével.

Mind az észlelés, mind az attribúció statisztikai elemzésre támaszkodik. Az észlelés arra összpontosít, hogy a változások elég jelentősek-e ahhoz, hogy az októl függetlenül kiemelkedjenek a véletlenszerű változásokból. Az attribúció a megfigyelt események összehasonlítását jelenti a modell által generált ellentmondásos esetekkel. Mivel éghajlati kísérleteket nem lehetséges végezni, az attribúció statisztikai következtetést igényel annak felmérésére, hogy az emberi tevékenység (például az üvegházgáz-kibocsátás) és a természetes tényezők (például a vulkánkitörések) mennyire járulnak hozzá a megfigyelt változásokhoz. Az attribúciós módszerek feltételezik, hogy a rendszer összes külső és belső mozgatórugója ismert és jelen van.

Az attribúciós módszerekről folyamatos tudományos viták zajlanak, különösen azokról, amelyek szélsőséges időjárási eseményeket tulajdonítanak az éghajlatváltozásnak. Az IPCC régóta figyelmeztet, hogy az éghajlattudományban az oksági összefüggések megállapítására szolgáló

módszerek eleve bizonytalanok, és a döntés végső soron a szakértői megítéléstől függ. Az AR4 I. munkacsoport (Hegerl et al., 2007) a következőképpen magyarázta ezt:

Az éghajlatváltozás okainak „hozzárendelése” az a folyamat, amelynek során meghatározott megbízhatósági szinttel megállapítjuk a kimutatott változás legvalószínűbb okait... az egyértelmű attribúcióhoz (hozzárendeléshez) az éghajlati rendszerrel ellenőrzött kísérletek elvégzésére lenne szükség. Mivel ez nem lehetséges, a gyakorlatban az antropogén klímaváltozási okutajdonítás (attribúció) alatt azt értjük, hogy egy észlelt változás „összhangban van az antropogén és természetes kényszerítő tényezők adott kombinációjára adott becsült válaszokkal”, és „nem egyeztethető össze a közelmúltbeli klímaváltozás alternatív, fizikailag hihető magyarázataival, amelyek kizárják az adott kényszerítő tényezők kombinációjának fontos elemeit” (IPCC, 2001)... A fent leírt, észlelési és attribúciós kutatásokban alkalmazott megközelítések nem tudják teljes mértékben figyelembe venni az összes bizonytalanságot, ezért végső soron szakértői megítélésre van szükség ahhoz, hogy hiteles értékelést legyen adható arról, hogy egy adott ok felelős-e egy adott klímaváltozásért.

Az AR5 II. Munkacsoport (Cramer et al., 2014) a következőt nyilatkozza:

A klímaváltozás hatásainak észlelésével (a detektálással) és hozzárendelésével (az attribúcióval) kapcsolatos két fő kihívás a megfigyelésekhez és a folyamatok megértéséhez kapcsolódik. A megfigyelési oldalon ritkák a természeti és emberi rendszerekkel, valamint az azokat befolyásoló többszörös tényezőkkel kapcsolatos kiváló minőségű, hosszú távú adatok. Ezenkívül a klímaváltozás hatásainak detektálása és hozzárendelése megköveteli azoknak a folyamatoknak a megértését, amelyek révén a klímaváltozás más tényezőkkel együtt befolyásolhatja a szóban forgó rendszert.

Az éghajlati rendszerben az ok-okozati láncok összetettsége miatt ezen kapcsolatok vizsgálata rendkívül nagy kihívást jelent.

8.2 Oktulajdonítási módszerek

A megfigyelt éghajlatváltozások okainak kiértékelésére az IPCC számos attribúciós (okutajdonítási) módszert alkalmaz, hogy elkülönítsék a természetes és az ember által okozott tényezőket. Az alábbiakban a legfontosabb IPCC attribúciós módszerek tömör leírását találjuk.

Az optimális ujjlenyomat-elemzés a megfigyelt éghajlati adatok változásainak magyarázatára lineáris regressziót használ, antropogén kényszerítő tényezők figyelembe vételével és azok nélkül futtatott éghajlati modell-szimulációk súlyozott összegeként. A regressziós modellben használt adatokat súlyozzák, hogy megpróbálják minimalizálni a véletlenszerű zaj hatását, és a becslési módszert úgy választják meg, hogy figyelembe vegye az éghajlati modell hibáját.

Az idősoros elemzés az antropogén kényszerítő tényezők és a természetes változékonyság közötti statisztikai különbségeket használja ki annak megállapítására, hogy melyik dominál a megfigyelt hőmérsékletekben, és a változások időzítésének változásait is felhasználja annak meghatározására, hogy kikövetkeztethető-e az ok-okozati összefüggés az adatsorok között.

A folyamatalapú attribúció a megfigyelt változások mögött meghúzódó fizikai mechanizmusok megértésére összpontosít. Ez a megközelítés ötvözi a megfigyeléseket, az éghajlati modelleket és az elméleti ismereteket, hogy a specifikus folyamatok változásait a kényszerítő tényezőknek lehessem tulajdonítani. Ezt a megközelítést gyakran alkalmazzák regionális éghajlati jelenségek, például monszunváltozások vagy sarkvidéki amplifikáció esetén.

A szélsőséges eseményhozzárendelés az emberi befolyás szerepét vizsgálja a szélsőséges időjárási események (pl. hőhullámok vagy aszályok) előfordulásának valószínűségében vagy intenzitásában. A módszerek a következők:

- A valószínűségi eseményhozzárendelés az éghajlati modell szimulációk nagy együtteseit használja a megfigyelt események és a modell által generált ellentmondásos (kontrafaktuális) esetek összehasonlítására.
- A történetalapú megközelítés az eseményeket előidéző fizikai folyamatokat vizsgálja, és értékeli ki, hogy az antropogén kényszerítő tényezők hogyan módosíthatták ezeket a folyamatokat.

8.3 A globális felmelegedés okutalajdonítása

A három legutóbbi IPCC értékelő jelentésben a globális felmelegedéssel kapcsolatos okutalajdonítási (attribúciós, hozzárendelési) állítások a következők:

AR4: A 20. század közepe óta megfigyelt globális átlaghőmérséklet-**növekedés legnagyobb része** valószínűleg az antropogén üvegházhatású gázok koncentrációjának megfigyelt növekedésének köszönhető (IPCC 2007).

AR5: *Rendkívül valószínű*, hogy a globális átlagfelszín-hőmérséklet 1951 és 2010 között **megfigyelt emelkedésének több mint felét** az üvegházgáz-koncentráció antropogén eredetű növekedése és egyéb antropogén tényezők együttesen okozták. Az ember okozta felmelegedéshez való hozzájárulás legjobb becslése hasonló mértékű, mint az ugyanebben az időszakban megfigyelt felmelegedés. (IPCC 2013)

AR6: Az ember okozta globális felszíni hőmérséklet-emelkedés valószínűsíthető tartománya 1850–1900 és 2010–2019 között 0,8°C és 1,3°C között van, a legjobb becslés 1,07°C. Valószínű, hogy a jól kevert üvegházhatású gázok 1,0°C és 2,0°C közötti felmelegedést, egyéb emberi tényezők (főként aeroszolok) 0,0°C és 0,8°C közötti lehűlést okoztak, a természetes tényezők pedig –0,1°C és +0,1°C közötti mértékben változtatták a globális felszínhőmérsékletet, míg a belső változékonyság –0,2°C és +0,2°C közötti mértékben változtatott. Nagyon valószínű, hogy 1979 óta a troposzféria-felmelegedés fő mozgatórugói a jól kevert üvegházhatású gázok (IPCC 2021).

Az AR4 és AR5 attribúciós nyilatkozatok a 20. század közepe óta tartó felmelegedésre utalnak, arra az időszakra, amikor az üvegházgáz-kibocsátásban gyors növekedés kezdődött. A „legtöbb” és a „több mint a fele” szavak szándékosan pontatlanok, a felmelegedés 51 és 99 százaléka között mozoghatnak. E pontatlanság feltehetően a strukturális bizonytalanságok, például a természetes belső változékonyság figyelembevételét szolgálja. A megbízhatósági szint az AR4-től az AR5-re *nagyon valószínűről rendkívül valószínűre* nő. Az AR6-ban szereplő attribúciós állítás szerkezete alapvetően eltérő, a felmelegedést az 1850–1900 közötti időszakra vonatkoztatják. Az AR6 attribúciós állítása számszerűen pontosabb, bár a „valószínű” egy alacsonyabb megbízhatósági szintet jelent – az AR6 a felmelegedést lényegében teljes egészében az üvegházgáz-koncentráció emelkedésének tulajdonítja. Az AR6 leginkább magabiztos állítása az 1979 óta bekövetkezett troposzférikus felmelegedéssel kapcsolatos, a „fő mozgatórugó” és a „nagyon valószínű” szavak használatával.

Az IPCC a jelenkori felmelegedés okainak értékelésével kapcsolatban három területen kkap érdemi kritikát: a természetes éghajlati változékonyság nem megfelelő értékelése, nem megfelelő statisztikai módszerek, valamint a modellek és a megfigyelések közötti jelentős eltérések. Az utóbbit az 5. fejezet tárgyalja, míg ez a fejezet az első két tényezőt veszi számba. Mindezek a kritikák a jelenkori felmelegedés IPCC-attribúciójára vonatkoznak, amelyben az IPCC még a szélsőséges események attribúcióját is alátámasztotta.

8.3.1 Természetes éghajlati változékonyság

Az AR6 kijelenti, hogy az 1850-1900 közötti természetes külső tényezők a globális felszíni hőmérsékletet $-0,1^{\circ}\text{C}$ és $+0,1^{\circ}\text{C}$ - közötti értékben változtatták, a belső változékonyság pedig $-0,2^{\circ}\text{C}$ - és $+0,2^{\circ}\text{C}$ közötti értékben – átlagosan lényegében nem voltak semmilyen nettó hatással az 1850-1900 közötti felmelegedésre. Amint azt alább tárgyaljuk, a természetes változékonyság ezen minimális hozzájárulását számos publikáció vitatja, megkérdőjelezve a napenergia-változékonyság és a nagyléptékű óceáni cirkulációkból eredő belső változékonyság elhanyagolhatóságát

Napsugárzás-változékonyság

Az AR5 arra a következtetésre jutott, hogy az 1750–2011 közötti időszakban a teljes napsugárzás (TSI) változásai miatti sugárzási kényszer a legjobb becslés szerint nagyon csekély volt ($0,05 \text{ W/m}^2$, Myrhe et al., 2014). Az AR6 az elmúlt évszázadokra lényegesen magasabb értékeket és a TSI változás-becslésre sokkal szélesebb tartományt ismer el, kijelentve, hogy a TSI a Maunder-minimum (1645–1715) és a huszadik század második fele közötti $0,7\text{--}2,7 \text{ W/m}^2$ -rel nőtt, ez a tartomány magában foglalja mind az alacsony, mind a magas változékonyságú TSI adatkészleteket (Gulev, 2021). Az AR6-ban attribúciós vizsgálatokhoz használt CMIP6 klímamodell-szimulációkhoz ajánlott kényszerítő adatkészlet azonban két alacsony napsugárzási változékonyságú adatkészlet átlagát veszi alapul (Matthes, 2017).

Bár az AR6 lényegesen nagyobb napsugárzási hatást mutat, mint az AR5, a napsugárzás éghajlatra gyakorolt teljes hatását az antropogén kényszerhez képest továbbra is csekélynek értékelték. A napváltozások éghajlatra gyakorolt hatása azonban bizonytalan, és ma is jelentős vita tárgyát képezi (Lockwood, 2012; Connolly et al., 2021) – ami az IPCC értékelő jelentéseiben nem derül ki.

A TSI időbeli változása továbbra is kihívást jelent. 1978 óta műholdak mérik közvetlenül a TSI-t. Az adatok azonban nem elhanyagolható ellentmondásokról tanúskodnak, úgyhogy a TSI több évtizedes trendjeinek értelmezéséhez időben átfedő műhold-megfigyelések et kell egymással összehasonlítani. Számos egymással versengő összetett TSI adatkészlet létezik, amelyek között eltérés van abban, hogy az 1986–96 közötti időszakban a TSI nőtt-e vagy csökkent az (ez az ún. az ACRIM-hézag; lásd a 4. fejezetet). Továbbá a TSI műholdas adatait olyan proxy modellek kalibrálására használják, amelyek a napfoltokból és a kozmogén izotópmérésekből következtetnek a múltbeli napváltozásokra (Velasco Herrera et al., 2015).

Jelentős bizonyítékok vannak arra, hogy a 20. század második felében (1959-tel kezdődően) erős naptevékenység volt megfigyelhető, amely az 1990-es évekig terjedt, mielőtt a 21. század elején hanyatlás következett volna be; ezt az időszakot gyakran nevezik „modern maximumnak” (Chatzistergos et al., 2023; Solanki et al., 2004; Usoskin et al., 2007). Egyes kutatók azonban arra a következtetésre jutottak, hogy nem lehet teljes bizonyossággal kijelenteni, hogy a TSI több évtizedes trendje is változhat (Schmutz, 2021).

E bizonytalanság azt eredményezi, hogy a TSI egyes 1750-től kezdődő rekonstrukciói alacsony változékonyságot mutatnak (ami a napváltozások nagyon alacsony hatását sugallja a globális felszíni átlaghőmérsékletre), míg a magas TSI-változékonyságú adatsorok az iparosodás előtti idők óta a hőmérséklet-változások több mint 70 százalékát megmagyarázhatják (Scafetta, 2013; Stefani, 2021). Az elemzésben használt TSI műholdfelvételek megválasztása ezért jelentősen befolyásolhatja, hogy az éghajlatváltozást mennyiben tulajdonítják az emberi, illetve a természetes kényszereknek. Egyre több bizonyíték van arra, hogy a napsugárzás változékonyságának egyéb vonatkozásai, amelyeket közvetett napenergia hatásoknak neveznek, vagy felerősítik a TSI-kényszert, vagy a TSI-kényszertől függetlenek. Scafetta et al. (2023) szerint a napenergia éghajlatra gyakorolt hatásának ~80 százaléka nem TSI-mechanizmusokból eredhet. Számos lehetséges folyamat létezik, beleértve a Nap ultraibolya-változásait; az nagyenergiájú részecskék kicsapódását; a lélegektromos tér hatását a felhőzetre; a Nap által modulált galaktikus kozmikus sugárzás által előidézett felhőzetváltozásokat; a mágneses tér nagy relatív változásait; és a napszél erősségét. Effajta közvetett naphatásokat az éghajlati modellek nem tartalmaznak, bár a hatásuk becslésére szolgáló közvetett módszerek azt sugallják, hogy jelentősek. Az

éghajlatot befolyásoló nem TSI-mechanizmusokra vonatkozó állítások azonban bizonytalanok és vitatottak.

A nagyleptékű óceáni cirkulációk természetes változékonysága

A globális felszínhőmérséklet átlagos változásai összefüggenek az óceáni cirkulációs minták visszatérő nagyleptékű váltoásaival, beleértve az Atlanti-óceán több évtizedes oszcillációját (AMO), a Csendes-óceán évtizedes oszcillációját (PDO), valamint az El Niño-Déli oszcillációt (ENSO). Ezek a cirkulációk befolyásolják az óceán hőfelvételét és hőeloszlását, valamint a légköri cirkulációs mintákat és a felhőeloszlást. Vita folyik arról, hogy ezek a változások szigorúan az éghajlati rendszer belső tényezői-e, vagy lehet-e nap-/csillagászati eredetű, esetleg befolyásolhatják-e nagy vulkánkitörések.

Bár az éghajlati modellek szimulálják a nagyleptékű óceáni cirkulációkat és a belső éghajlati változékonyságot, a legtöbb modell a több évtizedre visszamenő megfigyelésekhez képest túl kicsi amplitúdót mutat, és a modellnek a megfigyelt éghajlattal való együttes változása fokozatosan eltűnik (Kravtsov et al. 2024). Több szimuláció átlagolása hatékonyan átlagolja a belső változásokat, és csak a kényszerített éghajlati változékonyságot hagyja meg (pl. CO₂-kényszerítés). Mivel a jelenkori felmelegedés nagy része az 1970-es évek végén kezdődött, a mostani 50 éves felmelegedés időleptékben ugyanaz, mint az AMO és a PDO több évtizedes oszcillációi.

Az AR5 és AR6 jelentések összefoglaló megállapításai:

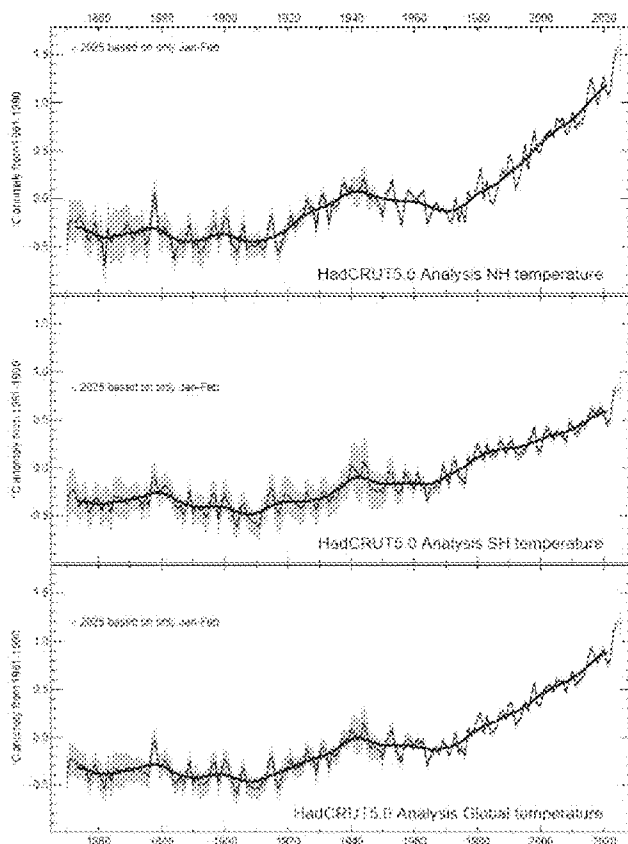
AR5: A Csendes-óceán évtizedes változékonysága, amely a PDO-hoz vagy az IPO-hoz kapcsolódik [IPO: évtizedek közötti - interdekadós - csendes-óceáni oszcilláció], jelentősen hozzájárul a regionális és globális hőmérsékleti trendekhez, de a belső változékonyság és a külső kényszer relatív hozzájárulását nehéz a CMIP5 szimulációkban szétválasztani.

AR6: Az AR5 óta egyre jobban megértjük a belső változékonyság, például az ENSO, a PDO és az AMO szerepét a regionális éghajlati trendek modulálásában. Azonban ezen módusok pontos időzítésével és amplitúdójának szimulációjával kapcsolatos CMIP6 modellkorlátok következtében (is) a megfigyelt változások antropogén kényszernek való tulajdonítása bizonytalan (*nagy megbízhatóságú megállapítás*).

A több évtizedes oszcillációk globális hőmérsékletre gyakorolt csúcspont-mélypont hatásának amplitúdóját az IPCC AR6 a következőképpen értékelte: „A belső változékonyság miatti változás valószínűsíthető tartománya -0,2°C és +0,2°C között van (IPCC, 2021).” Ez 0,4°C-os mélypont-csúcspont változást jelent. Évszázadokon keresztül globális hőmérséklet-változások folyamán a mélypontok és a csúcspontok hatása kioltódnak, és a nettó hatás csekély vagy nulla.

Az olyan oszcillációk esetében azonban, mint az AMO és a PDO, a csúcspontok és mélypontok időzítése összetéveszthető az évszázados trenddel. E kérdés az elmúlt 50 év felmelegedésének oktulajdonításában (amikor a közelmúltbeli felmelegedés nagy része bekövetkezett) nagyon fontosá válik. Még ha a klímamodellek a több évtizedes oszcillációk helyes amplitúdójával is rendelkeznek, a csúcspontok és mélypontok időzítése nincs megfelelően szimulálva, mivel minden modell és az egyes együttesek eltérő fázisokat szimulálnak. Miután a modellgyűttes tagjainak és a különféle modelleknek a szimulációit átlagolták, a természetes belső változékonyság hozzájárulása a fáziskülönbségek miatt kiátlagolódik, ami a természetes belső változékonyság szerepét az attribúciós folyamatban gyakorlatilag kioltja.

A globális felszínhőmérséklet-anomáliák 1850 óta tartó idősorai (8.1. ábra) egy általános felmelegedést mutató trendhez hozzáadódóan jelentős amplitúdójú szabálytalan változásokat mutatnak, és 1976 után az északi és a déli félteke közötti trendben markáns különbség alakul ki. Az 1905-1945 közötti időszak erős felmelegedési tendenciát mutatott. A következő 30 évben, 1945-1976 között, enyhén csökkenő hőmérsékleteket tapasztaltak. A legutóbbi felmelegedési időszak 1977-ben kezdődött.



8.1. ábra: A globális átlagos felszínhőmérséklet-anomália 1850–2025 között. Fent: Északi félteke. Középen: Déli félteke. Alul: Globális átlag. Forrás: UK Hadley Centre
<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT5.0Analysis.pdf>

A 20. század eleji felmelegedés okait Hegerl et al. (2017; 2019) tárgyalja. A légköri CO₂-koncentráció 298 ppm-ről (1905) 310 ppm-re (1941) nőtt, ami arra utal, hogy a CO₂-nek csekély volt a hatása. A vulkáni aktivitás ebben az időszakban nagyon alacsony szintű volt, a napenergia-kényszer pedig bizonytalan. Hegerl et al. (2017) valamilyen módon mégis arra következtetett, hogy ennek a felmelegedésnek a 40-54 százaléka külső kényszernek tulajdonítható, a többi pedig belső változékonyságnak. Bronniman et al. (2024) a 20. század első évtizedében a déli féltekén bekövetkezett lehülés okaira összpontosított. Megállapította, hogy a lehülés a Csendes-óceán La-Niña-szerű mintázatahoz, egy hűvös trópusi és szubtrópusi Dél-Atlanti-óceánhoz, egy hideg extratrópusi Dél-Csendes-óceánhoz és hűvös déli közepes szélességi körökön található szárazföldi területekhez kapcsolódott. A Déli Gyűrűs Módus (SAM) pozitív volt, erősödött az Amundsen-Bellingshausen-tengerek alacsony értékével, bár az adattermékek szórása jelentős.

Az 1930-as évek felmelegedése és az azt követő lehülés a század közepén különösen hangsúlyos volt az Arktiszon. Bokuchava és Semenov (2021) megállapították, hogy ezeket a változásokat valószínűleg az Észak-Atlanti-óceán és az Észak-Csendes-óceán hosszú távú természetes éghajlati változásainak együttes hatása okozta, hozzájárulva a lecsökkent vulkáni aktivitáshoz és a naptevékenység változásaihoz kapcsolódó természetes sugárzási kényszerhez, valamint a emelkedő üvegházgáz-koncentrációhoz. Tokinaga et al. (2017) kimutatta, hogy a 20. század elején a belsőleg generált csendes-óceáni és atlanti interdekádos (évtizedek közötti) változékonyság együttes hatása fokozta az Arktisz felmelegedését. A szinkronizált csendes-óceáni-atlanti felmelegedés drasztikusan megváltoztatja a bolygóméretű cirkulációkat az északi féltekén; ugyanezek a cirkulációs minták globális hatással is bírnak.

Az 1945 és 1976 közötti lehülési időszakot „nagy szünetnek” nevezik. Számos okot feltételeztek: a csendes-óceáni évtizedes oszcillációval és az atlanti több évtizedes oszcillációval összefüggő ingadozásokból eredő természetes belső változékonyságot; az ipari tevékenységekből származó aeroszolkibocsátás növekedése miatti lehülést; megnövekedett hőfelvételt az Atlanti-óceánban, a Déli-óceánban és az Egyenlítői-óceánban. Thompson et al. (2010) azt állapította meg, hogy a huszadik század közepén a két félteke hőmérsékleti trendjei közötti különbség nagyrészt az északi félteke tengerfelszín-hőmérsékletének 1968 és 1972 közötti gyors, körülbelül 0,3 °C-os csökkenésének tudható be.

Az 1976-1977-es nagy csendes-óceáni éghajlatváltozás egy figyelemre méltó éghajlati esemény volt. Ezt az északi Csendes-óceán légkör-óceán rendszerének hirtelen változása jellemezte, ami kölcsönhatásba lépett a globális éghajlati mintázatokkal. Ez az eltolódás szorosan összefügg a Csendes-óceáni Évtizedes Oszcillációval (PDO), amely évtizedek leforgása alatt oszcillál a meleg és a hideg fázisok között. Az 1976-os eltolódás átmenetet jelentett egy túlnyomórészt negatív (hideg) PDO fázisból (1947–1976) egy pozitív (meleg) fázisba (1977-től 2000-ig), jelentős következményekkel járva a globális és regionális éghajlati mintázatokra, beleértve az El Niño és a La Niña események gyakoriságát is. A Nagy Csendes-óceáni Éghajlati Eltolódást (GPCS) egybeesett a felgyorsult globális felmelegedés időszakának kezdetével. Ha a Nagy Csendes-óceáni Éghajlati Eltolódást figyelembe vesszük az 1950 óta végzett éghajlati attribúciós elemzésekben, a 20. század második felében bekövetkezett felmelegedés 40 százalékát vagy annál többet a természetes belső változékonyságnak tulajdonítanak (McLean et al., 2009; Tung és Zhou, 2013; Chylek et al., 2016; Scafetta, 2021).

8.3.2 Optimális ujjenyomatvétel

Az optimális ujjenyomatvétel egy Allen és Tett (1999) által bevezetett statisztikai technika, amelyben a megfigyelt éghajlati adatokat éghajlati modell szimulációkkal hasonlítják össze abból a célból, hogy azonosítsák az emberi vagy természetes kényszerekhez kapcsolódó mintázatokkal (vagy „ujjenyomatokkal”). A módszer magában foglalja az észlelt éghajlati változások egy vektorának – például a világ különféle pontjain mért felmelegedési ütemeknek – együttes figyelembe vételét, és súlyozott összegű „jelek” -re való bontását, hogy a különböző típusú kényszerekkel rendelkező éghajlati modellek által generált modellmegfigyelésekkel azonos eredményt kapjanak. A súlyokat a Teljes Legkisebb Négyzetek Elmélete (TLS) nevű regressziós módszerrel választják ki. Az elemzés általában csak két jelet használ, az egyiket csak antropogén kényszereket használó modellek, a másikat pedig csak természetes kényszereket használó modellek generálják. Ha a jelhez tartozó becsült súlyozási együttható szignifikánsan eltér nullától, akkor a jelet „észleltnek” nevezik. Ha közel van 1-hez, akkor a jelet generáló modellt konzisztensnek mondják a megfigyelésekkel. Ha kisebb, mint 1, akkor az adott kényszer modellje túl erős, és csökkenteni kell, illetve fordítva. Mind a megfigyelt adatokat, mind a jeleket az éghajlati rendszer véletlenszerűségeinek modell által generált becslésével súlyozzák, hogy maximális súlyt adjanak azoknak a régióknak, ahol a természetes változékonyság minimális.

Az optimális ujjenyomat-készítés az attribúciós kutatási szakirodalom elsődleges eszköze. Bár az IPCC 2001 óta széles körben használja és kiemelten kezeli, nagyon kevés szakirodalom vizsgálja az általa generált eredmények statisztikai tulajdonságait. Az egyik eredendő gyengesége az, hogy az eredmények az éghajlati modellek pontosságára vonatkozó feltételezésektől függenek, különösen a természetes változékonyság ábrázolását illetően (IPCC AR5 10.2.3. fejezet).

McKitrick tanulmánysorozata (McKitrick 2021, 2022, 2023, 2025) megkérdőjelezte az optimális ujjenyomat-készítési módszert, azzal érvelve, hogy az eredendően megbízhatatlan, és hogy az ökonometriából átvett gyakorlatok érvényesebb eredményeket adhatnak. A statisztikai elmélet megköveteli, hogy a regressziós modellek torzítatlan együtthatókat szolgáltatassanak, ez esetben teljesül a Gauss-Markov feltételeknek nevezett feltételezési halmaz. McKitrick (2021) azzal érvelt, hogy az Allen és Tett (1999) módszertan sérti a Gauss-Markov feltételeket, ami potenciálisan torzított és inkonzisztens ujjenyomat-együtthatókhoz vezet, aláásva a módszer megbízhatóságát. Chen et al. (2023) megerősítették ezt az elemzést, bár azzal érveltek, hogy a módszer nagyon szigorú

feltételezések mellett jó eredményeket hozhat. McKitrick (2022) és (2023) további aggodalmakat is megemlített, ugyanis a klímakutatók – a tudományos diszciplínák között gyakorlatilag egyedülként – TLS-t használtak antropogén üvegházhatású gázok jel-együtthatóinak becslésére, annak ellenére, hogy annak a tendenciája instabil, ha csak nem áll fenn néhány olyan erős feltételezés, amelyek teljesülése a gyakorlatban nagy valószínűséggel lehetetlen. Az optimális ujjlenyomatvétel során a szokásosan felmerülő körülmények között a TLS-becslések nagy pozitív torzítást hordoznak magukban. Így minden olyan tanulmány, amely optimális ujjlenyomatvételhez anélkül használt TLS-t, hogy ellenőrizte volna annak alkalmazhatóságát az adott adatkörnyezetben, valószínűleg túlbecsülte az attribúciót.

McKitrick (2025) empirikus példát mutatott be a hagyományos optimális ujjlenyomatvétel eredményeinek és a mainstream ökonometriából származó módszereknek az összehasonlításáról. Az utóbbiakról ismert, hogy specifikus alkalmazások egyikeként jeldetektálásra is alkalmasak. Míg az IPCC optimális ujjlenyomatvételi módszere egy 1900 és 2010 közötti globális hőmérsékleti adathalmazon közel 1,0-es antropogén jel-együtthatót eredményez, a konzisztens módszer körülbelül 0,4-es együtthatót eredményez, amely az 1980 és 2010 közötti adatokon körülbelül 0,65-re emelkedik, ami azt jelenti, hogy az üvegházhatású gázokra adott modellválaszt körülbelül a felére kell csökkenteni, hogy optimálisan illeszkedjen a megfigyelésekhez. Ezzel szemben a természetes kényszerítő jel együtthatója 2,0 és 4,0 között van, ami azt jelenti, hogy a természetes kényszerítő éghajlati modelleket két-négyszeresére kell felszorozni, hogy megfeleljenek a megfigyelt éghajlatváltozásnak. A McKitrick (2025) által becsült ujjlenyomat-együtthatók, amikor az adatkészletben azokat a kényszerítő jelek generálására használt klímamodellek átlagos érzékenységeinek skálázására használják, 1,4°C-os átmeneti klímaérzékenységet mutatnak. Ez az érték összhangban van Lewis (2023) becslésével, amely egy másik becslési módszert és több független adatkészletet használ.

Ezek az eredmények azt mutatják, hogy az az alap, amiről kiindulva az optimális ujjlenyomat-módszert sokáig megbízhatónak tekintették, rossz. Annak meghatározásához, hogy mely eredmények statisztikailag robusztusak, a korábbi eredmények egyenkénti újrvizsgálatára lenne szükség.

8.3.3 Idősoros módszerek

Az IPCC (AR5 WGI 10.2.2) felfigyelt az oksági összefüggések értékelésének az idősoros ökonometria szakirodalmából felmerült alternatív megközelítéseire. Ezeknek az az előnyük, hogy nem az éghajlati modellek pontosságára vonatkozó feltételezéseken alapulnak, hátrányuk viszont, hogy függenek az éghajlati és kényszerítő adatok mögött meghúzódó adatgeneráló folyamattal kapcsolatos, nehezen tesztelhető feltételezésektől. A ma klímaökonometriának nevezett módszerek olyasféle eszközöket használnak, mint egységgyök-tesztelés, Granger-okszági analízis és kointegrációs analízis. Ezeknek mindegyike ismerős a közgazdaságtanból és a pénzügyekből, és lassan alkalmazásra kerülnek a klímatudományban is. Az idősoros elemzési módszerek lehetőséget kínálnak annak meghatározására, hogy a klímaváltozás elsődleges mozgatórugói antropogén vagy természetes tényezők-e, anélkül, hogy klímamodelleket kellene használni, bár kulcsfontosságú kérdések továbbra is tisztázatlanok (pl. Dergiades et al., 2016, Balcombe et al., 2019, Dagsvik et al., 2020, Razzak, 2022, Dagsvik és Moen, 2023).

A „Granger-okszági” modellezés az együtt mozgó adatsorok befolyásolási irányainak meghatározására alkalmas eszköz. Ez egy statisztikai fogalom, nem fizikai. Ha egy változó aktuális értékének ismerete jelentősen javítja egy másik változó előrejelzésének pontosságát, ebből oksági összefüggésre következtethetünk; ezt Granger-okszági viszonyoknak nevezzük. A modellezőeszközök, az úgynevezett vektor autoregresszió, közvetlen impulzus-válasz mintázatokat és visszacsatolásokat mér. A jól ismert Vosztkó jégmagadatokra történő alkalmazás hibát tárt fel Al Gore *Kellemetlen igazság* című dokumentumfilmjében. Gore bemutatta az adatokat, és felhívta a figyelmet a hőmérséklet és a CO₂ változás közötti koherenciára egy 440 000 éves időszak folyamán, amelyről Gore azt állította, hogy a hőmérséklet-változásokat a CO₂ okozza. A hőmérséklet-változások azonban befolyásolhatják a légköri CO₂-szintet. Davidson et al. (2015) megvizsgálta az idősorokat, és az derült ki, hogy a CO₂-

nek Granger-oka hőmérséklet, de fordítva ne is áll fenn. Más szóval, a Vosztok-adatokban ábrázolt időléptékekben a sorozat koherenciája elsősorban a hőmérséklet CO_2 -szintre gyakorolt hatásának a következménye, nem pedig a CO_2 -szint hőmérsékletre gyakorolt visszacsatolása.

Összefoglalva, az éghajlati adatok ok-okozati összefüggéseinek két elsődleges statisztikai módszerei: az optimális ujjenyomatvétel és az idősoros elemzés. Az attribúciós szakirodalomban Allen és Tett (1999) optimális ujjenyomatvételi módszerének alkalmazásai dominálnak, és ezzel alátámaszthatók voltak a korábbi IPCC-következtetések. Az eredmények azonban függenek az éghajlati modellek pontosságától, és a módszer közelmúltbeli bírálatok szerint „eredendően elfogult”. Az idősoros módszerek nem függenek az éghajlati modellektől, de saját feltételezéseket igényelnek, és olyan eredményeket generáltak, amelyek eddig egyáltalán nem konvergáltak konszenzus felé.

8.4 Csökkenő bolygóalbedő és a legutóbbi rekordmelegedés

A globális átlaghőmérséklet hirtelen emelkedése előtérbe állította az éghajlat rövid távú mozgatórugóinak kérdését. Az egyik ilyen jelölt az elnyelt napsugárzás aránya, amely az elmúlt években szintén hirtelen megnőtt. A kérdés az, hogy a változás az üvegházgázok okozta felmelegedés belső visszacsatolása-e, vagy valami más növelte az elnyelt sugárzás arányát, amely aztán a közelmúltbeli felmelegedést okozta.

A bolygóalbedő a bejövő napsugárzás azon részaránya, amely visszaverődik az űrbe, ahelyett, hogy azt a bolygó elnyelné. E tekintetben az erősen fényvisszaverő felületek: a felhők teteje, valamint a hó és a jég a legfontosabbak. A Föld albedója körülbelül 30 százalék, ami azt jelenti, hogy a Földet elérő napfény közel egyharmada közvetlenül visszaverődik az űrbe. Az alacsonyabb albedó azt jelenti, hogy a bolygó több napenergiát nyel el, amit aztán hőként sugároz vissza. Ezért, ha minden más tényező változatlan, a bolygó albedójának csökkenése a Föld felmelegedésével jár.

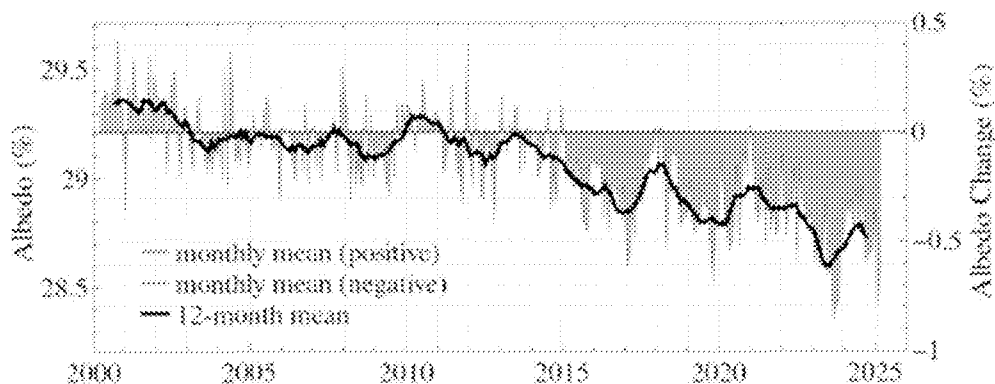
A Föld éghajlati rendszerében vitathatatlanul a legszembetűnőbb 21. század változás, hogy a bolygó albedója 2015 óta jelentősen csökkent, amely folyamat legalább két éven át egybeesett a rekordot elérő globális melegedés időszakával. A 8.2. ábra a bolygó albedójának 2000 óta bekövetkezett változásait mutatja. (Jó műholdas megfigyelések 2000 óta vannak). A bolygó albedójának 0,5 százalékos csökkenése 2015 óta az átlagosan elnyelt napsugárzásban $1,7 \text{ W/m}^2$ -es növekedésnek felel meg (Hansen és Karecha, 2025). Összehasonlításképpen, Forster et al. (2024) becslése szerint a légköri CO_2 -koncentráció az iparosodás előtti időkhöz viszonyított növekedéséből adódó jelenlegi kényszerérték $2,33 \text{ W/m}^2$.

A 2000 előtti, kevésbé megfelelő adatokkal rendelkező időszakra visszatekintve Goessling et al. (2025) értékelése szerint a bolygó albedója viszonylag alacsony volt az 1940-es és 50-es évek körül, mielőtt az ipari aeroszol prekursor kibocsátásának növekedése az 1980-as évekig megnövelte volna az albedót. A legnagyobb bolygóalbedó-eltéréseket a vulkánkitörések okozta magas albedójú epizódok okozták, például az 1991-es Pinatubo-kitörés után. Bár bizonytalan, de lehetséges, hogy a 2023-as bolygóalbedó-albedominimum volt legalább 1940 óta a legalacsonyabb albedóérték.

A felszíni jellemzők változásai nem magyarázzák a bolygóalbedó 2015 óta bekövetkezett csökkenését:

- Az északi-sarki tengeri jég kiterjedése 1980 óta körülbelül 5 százalékkal csökkent (https://nsidc.org/data/seaice_index/images/s_plot_hires.png), bár 2007 után az északi-sarki tengeri jég csökkenése szünetelt (England et al., 2025)
- Az antarktiszi tengeri jéggel kapcsolatban az IPCC AR6 arra a következtetésre jut, hogy „1979 és 2020 között az antarktiszi tengeri jég területén a regionálisan ellentétes trendek és a nagy belső változékonyság miatt nem volt jelentős tendencia.” (Összefoglaló a döntéshozók számára, A.1.5)
- Az északi féltekén az éves hótakaró 1967 óta lassan csökken, jelentősnek nem nevezhető tendenciával. Az adatok szerint az északi féltekén havasabb telek vannak, amelyeket tavasszal és nyáron gyorsabb olvadás kísér, lásd: <http://climate.rutgers.edu/snowcover/> és 5.6. szakasz

- A globális zöldülés (2. fejezet) hozzájárul a bolygó albedójának csökkenéséhez, mivel az erdők albedója alacsonyabb, mint a nyílt területeké vagy a hóé. Léteznek azonban bizonyítékok arra, hogy az erdők megnövelik a felhőzetet (ami erős fényvisszaverő képességet jelent), és ez ellensúlyozza az erdőterület növekedésével járó közvetlen albedócsökkenést.



8.2. ábra: A Föld albedója (fényvisszaverő-képesség, százalékban) , az évszakok hatásának eltüntetésével Forrás: Hansen és Karecha (2025)

A felszíni fényvisszaverő képesség változásai hozzájárulnak a bolygó albedójának kismértékű, lassú csökkenéséhez. Ezek a változások azonban nem magyarázzák a bolygó albedójának 2015-ben kezdődő meredek csökkenését. Továbbá a felszíni albedó bármilyen változása átlagosan körülbelül háromszoros faktorral csillapodik, mindenekelőtt a felhőtakaró miatt (Loeb et al. 2019). A felszín albedóváltozása így csak gyenge hozzájárulást jelent a közelmúltbeli bolygóléptékű albedócsökkenésben, különösen ami az éves átlagot és a globális értéket illeti. Ezért a legvalószínűbb magyarázatot a meredek albedócsökkenésre a légköri aeroszokok és/vagy a felhők változásai adják.

Az aeroszokok a légkörben található apró részecskék, amelyek visszaverik a napfényt, és kölcsönhatásba léphetnek a felhőfolyamatokkal, hogy a felhők fényvisszaverőbbek legyenek. Az aeroszokok lehetnek természetes eredetűek (pl. talajból, tüzekből származó por), valamint emberi eredetűek: égetésből származók (beleértve a fosszilis tüzelőanyagokat is). Azok a régiók, amelyek zöldülnek és/vagy ahol megnő a csapadékmennyiség, kevesebb port termelhetnek. Az antropogén aeroszokok esetében három szakaszban, 2010-ben, 2015-ben és 2020-ban vezettek be új, a kénkibocsátás csökkentését célzó hajóüzemanyag-szabályozást. A szulfátrészecskék visszaverik a napsugárzást, így a tisztább levegő azt jelenti, hogy kevesebb napsugárzás verődik vissza, ami hozzájárul a felszín felmelegedéséhez. A szulfátaeroszokok közvetett hatásai közé tartozik, hogy a szubtrópusokon megnő az alacsonyszintű felhők fényvisszaverő képessége. Vita övezi, hogy a szulfátkibocsátás változása mennyire jelentős a Föld sugárzási egyensúlyában (Hodnebrog et al., 2024; Yuan et al., 2024), de a főbb hajózási útvonalakra bevezetett korlátozás kismértékű globális hatásra utal (Schmidt, 2024).

A globális albedó 2015 óta tartó csökkenésére mindenekelőtt a felhők változásai adhatnak magyarázatot. A felhők tulajdonságainak közelmúltbeli változásaival két újabb tanulmány (Loeb et al., 2024; Goessling et al., 2024) is foglalkozott. Műholdas és újrafeldolgozási adatok figyelembevételével Loeb et al. megállapította, hogy az északi féltekén a bolygóalbedó csökkenésének fő oka az alacsony és a közepes szintű felhők 2015 óta tartó csökkenése, míg a déli féltekén a bolygóalbedó csökkenése elsősorban a közepes szintű felhők csökkenésének tudható be az összes földrajzi szélességi zónában. Goessling et al. (2024) megállapította, hogy a felhőanomáliák főként az alacsonyszintű felhők csökkenésének tudhatók be. Az elmúlt évtizedben koherens alacsonyszintű

felhőzet-csökkenéssel rendelkező régiók közé tartozik az Óceánia (Gél-kelet-Ázsia, „Maritime Continent”) körüli meleg medence régió és az északi extratropusi nyugati Csendes-óceán, valamint az Atlanti-óceán és a szomszédos szárazföldi régiók nagy része. Az ezekben az elemzésekben 2015 óta azonosított globális felhőzet-csökkenés 1-2 százalékos.

A kérdés ezt követően az, hogy vajon mi a felhőzetváltozás oka. Az elmúlt évtizedben a csökkenő felhőzetre két magyarázat született:

- Természetes éghajlati változékonyság
- Az alacsony szintű felhőzet változása a tengerfelszín-hőmérséklet emelkedésével van összefüggésben, ami a klímaváltozásra adott pozitív visszacsatolás kialakulására utal (Hansen és Karecha, 2025)

Nem könnyű igazolni egy 2015-ben kezdődött új pozitív alacsonyfelhőzet-visszacsatolást, mivel nincs akkoriban fellépő egyértelmű oka, ami visszacsatolást váltott volna ki. Ebben az időszakban azonban számos természetes éghajlati jel van, amely a légköri cirkuláció változásaihoz kapcsolódik, és befolyásolhatja a felhők eloszlását:

- A 2014-2016-os időszak volt az egyik legerősebb El Niño esemény, amit valaha feljegyeztek
- A 2015-ben kezdődő hideg anomália az Atlanti-óceán északi szubpoláris örvényében az óceáni cirkulációs mintázat eltolódását tükrözi, ami az Atlanti-óceán évtizedes változékonyságával jár (Frajka-Williams et al., 2017; Arthun et al. 2021).
- A Csendes-óceáni Évtizedes Oszcilláció (PDO) pozitív indexe 2016-ban tetőzött, majd csökkent, és 2019 vége óta a negatív tartományban van.
- A tengeralatti Hunga-Tonga vulkán kitörése 2022-ben

Az El Niño Déli Oszcillációhoz (ENSO) kapcsolódó évközi felhőanomáliák jelentős globális jellel és erős regionális jellel rendelkeznek, különösen a tropusi Indiai- és Csendes-óceán felett.

A Hunga Tonga kitörése figyelemre méltó, mivel egybeesik a 2023-as kivételesen alacsony bolygóalbedó értékkel. Goessling et al. (2024) megállapította, hogy a 2023-as felhőperturbációk a 2015 óta megfigyelt általános mintázattól eltérő mintázatot mutattak, a felhőzetcsökkenés az északi féltekén és a trópusokon volt a legkifejezettebb. A felhőzet regionális csökkenése a legkifejezettebb az Indiai-óceán keleti részén, Dél-Amerikában és a Csendes-óceán keleti részén, valamint Észak-Amerika északi részén, a Déli-óceánon a 60° déli földrajzi szélesség körül, a szubtrópusi és keleti Észak-Atlanti-óceánban, valamint az Észak-Csendes-óceán egyes részein volt.

A Hunga Tonga kitörése szokatlan volt, mivel szulfátrészecskék mellett nagy mennyiségű vízgőz jutott a sztratoszférába. Az első publikációk a sztratoszférikus cirkulációra gyakorolt hatásokra és a közvetlen sugárzási hatásra összpontosítottak. 2025-ben olyan tanulmányok jelennek meg, amelyek a Hunga Tonga felszíni éghajlatra gyakorolt közvetett hatásait földrendszer-modellekből származó együttes szimulációk segítségével vizsgálják (Bednarz et al., 2025; Kuchar et al., 2025). E tanulmányok statisztikailag szignifikáns hatásokat találtak a regionális éghajlatra. E hatásokat a sztratoszféra-troposzféra kapcsolatokból eredő cirkulációs változások okozták. A fenti tanulmányok a vulkáni tevékenység és az éghajlati dinamika közötti összetett kölcsönhatásokra utalnak. A Hunga Tonga-kitörés bolygóalbedóra gyakorolt hatásainak kibogozásához további kutatásokra van szükség.

Összefoglalva, a bolygóalbedó csökkenése és a felhőzet egyidejű csökkenése előtérbe állítja a felhők és a felhőváltozások jelentős szerepét a globális éghajlati változékonyságban, valamint a klímaváltozásban. A globális felhőzet 1-2 százalékos változása nagyobb sugárzási hatással van az éghajlatra, mint amekkora a CO₂ megduplázódásának közvetlen sugárzási hatása. Bár nehéz kibogozni a közelmúltbeli trend okait, a csökkenő felhőzet okára vonatkozó versengő magyarázatok jelentős következményekkel járnak az egyensúlyi klímaérzékenység kiértékelése és a közelmúltbeli felmelegedés okaként való értelmezése szempontjából. További 10 évnyi adat segíthet tisztázni, hogy ez a felmelegedéssel összefüggő erős pozitív felhő-visszacsatolás-e, vagy a természetes változékonyság által vezérelt átmeneti ingadozás.

8.5 Az éghajlati hatótényezőkrevonatkozó oktulajdonítás

Az IPCC (Ranasinghe et al. 2021) az „éghajlati hatások mozgatórugóit” vagy CID-eket (Climate Impact Driver) úgy határozza meg, mint „a társadalom vagy az ökoszisztémák valamely elemét befolyásoló fizikai éghajlati rendszerfeltételeket (pl. eszközök, események, szélsőségek)”. Ezért a CID-ek az időjárási és az éghajlati rendszer azon jellemzői, amelyek az éghajlatváltozás hatásainak felmérésében elsődlegesen érdekesek, mivel potenciális hatással vannak az emberekre és a természeti világra. Például a „Hő és hideg” címszó alatt a CID-eket az átlagos levegőhőmérséklet, a szélsőséges hőség, a hideg időszakok és a fagy jelenti. Az IPCC azt is kiemeli, hogy a CID-ek nem feltétlenül károsak: a szóban forgó rendszertől függően lehetnek károsak, semlegesek, előnyösek vagy mindezek kombinációi.

Ranasinghe et al. (2021, 1856. o.) 12.12. táblázatának első oszlopai, amelyeket itt 8.1. táblázatunként közlünk, összefoglalják az AR6 értékelését arról, hogy vajon az összes főbb időjárási tényezőben megjelent-e az antropogén hatás jele. A fejezet egyik témája, hogy az IPCC által használt attribúciós módszerek hajlamosak túlbecsülni az antropogén hatást, és alábecsülni a természetes változékonyság szerepét. Mindazonáltal az összefoglaló táblázat egyik feltűnő jellemzője, hogy milyen kevés időjárási tényező mutat olyan antropogén jelet, amely megkülönbözteti őket a természetes változékonyságtól.

A felsorolt 33 időjárási hatáskategória közül csak ötben állítanak *nagy megbízhatósággal* antropogén jelet, további négyben pedig *közepes megbízhatósággal*. (Megjegyzendő, hogy a CID-ek egyike maga a CO₂-szint emelkedése, és mivel ezt a megnövekedett CO₂-szintnek tulajdonítani szószaporítás (autológia), e CID figyelmen kívül hagyható.) A többi esetben az IPCC nem állítja, hogy antropogén tényezőket észlelt volna. Az öt *nagy megbízhatóságú* állítás közül kettő az átlaghőmérséklet (a legköri és óceáni) változásaira vonatkozik, ezek tehát nem a szélsőséges időjárás mértékei. Továbbá a négy *közepes megbízhatóságú* állítás közül kettő az óceánkémiai összetételhez kapcsolódik, azaz szintén nem a szélsőséges időjáráshoz. Az IPCC nem tart számon emberi befolyást számos nem hőmérsékleti időjárási jellemzőben, mint például a szél, a csapadék, az árvizek vagy az aszály.

Az IPCC 12.12. táblázatának egyéb oszlopai arról számolnak be, hogy ebben az évszázadban az RCP8.5 (a legszélsőségesebb kényszerítő forgatókönyv) szerint várhatóan antropogén jelek jelennek meg. Ezeket az oszlopokat több okból is kihagytuk. Először is, mert arra vonatkoznak, hogy a klímamodellek fognak-e kimutatható jeleket kivetíteni a megfigyelésekre, ami egészen más kérdés, mint amivel itt foglalkozunk: hogy mutattak-e ki jelet a történelmi adatokban. Másodszor, ahogy a 4. fejezetben tárgyaljuk, az RCP8.5 forgatókönyv egy félrevezető és valószínűtlen, szélsőséges történet, nem „alapvető” vagy szokásos üzletmenet-előrejelzés. Harmadszor, a részletes modellek együtteséről elismerik (Palmer és Stevens 2019), hogy „nem alkalmas a célra”, azaz a regionális változások leírására, és „nem képes a jövőbeli feltételeket olyan térbeli, időbeli és valószínűségi pontossággal ábrázolni, amellyel az előrejelzéseket gyakran készítik” (Nissan et al., 2019). Ezekkel a kikötésekkel együtt is megjegyezzük, hogy az AR6 12.12. táblázatának kihagyott oszlopai azt mutatják, hogy a legtöbb időjárási hatás a század végéig várhatóan nem mutat antropogén jelet.

Amint azt a 6. fejezetben tárgyaltuk, a szélsőséges időjárási rendszerek mintázataiban a természetes változékonyság dominál, és a trendészlelésre vonatkozó leegyszerűsített állításokat gyakran ássa alá a regionális heterogenitás és a trendek időbeli megfordulása. A 8.1. táblázat arra a kapcsolódó pontra mutat rá, hogy a legtöbb szélsőséges időjárási típus változásait jelenleg nem lehet emberi hatásoknak tulajdonítani. A szelet példaként véve az IPCC azt állítja, hogy az átlagos szélsőségekben, heves szélviharokban, trópusi ciklonokban vagy homok- és porviharokban nem jelent meg antropogén jel, és még szélsőséges kibocsátási forgatókönyv esetén sem várható ilyen ebben az évszázadban. Ugyanez vonatkozik az aszályra és a tüzesetekre is.

Climatic Impact-driver Type	Climatic Impact-driver Category	Already Emerged in Historical Period
Heat and Cold	Mean air temperature	1
	Extreme heat	2
	Cold spell	4
	Frost	
Wet and Dry	Mean precipitation	
	River flood	
	Heavy precipitation and pluvial flood	
	Landslide	
	Acidity	
	Hydrological drought	
	Agricultural and ecological drought	
	Fire weather	
Wind	Mean wind speed	
	Severe wind storm	
	Tropical cyclone	
	Sand and dust storm	
Snow and Ice	Snow, glacier and ice sheet	
	Permafrost	
	Lake, river and sea ice	11
	Heavy snowfall and ice storm	
	Hail	
	Snow avalanche	
Coastal	Relative sea level	
	Coastal flood	
	Coastal erosion	
Open Ocean	Mean ocean temperature	
	Marine heatwaves	
	Ocean acidity	
	Ocean salinity	13
	Deoxygenated oxygen	14
Other	Air pollution weather	
	Atmospheric CO ₂ at surface	
	Radiation at surface	

High confidence of decrease

Medium confidence of decrease

Low confidence in sign of change

Medium confidence of increase

High confidence of increase

8.1. táblázat: Az IPCC AR6 I. munkacsoportjának jelentéséből a 12.12. táblázat 1. oszlopának reprodukciója. Antropogén jel megjelenése a történelmi időszakban a bemutatott CID-ek esetében. Fehér: nincs észlelt jel. Kék és narancssárga: az észlelt változás (csökkenés vagy növekedés), valamint a színes jelmagyarázatban jelzett megbízhatósági szint. A számok adott régiókra és megbízhatósági szintekre utalnak: a megjegyzéseket lásd az eredeti táblázatban.

8.6 Szélsőséges eseményekre (EEA) vonatkozó oktulajdonítás

Az IPCC szélsőséges időjárási és éghajlati események attribúciója (oktulajdonítása, Extreme Event Attribution) általánosabb vizsgálata során az AR6 homályos értelmű értékelést ad az antropogén felmelegedés szerepéről, a különféle fejezetekben eltérő értelmezést szerepeltet. A WG1 11. fejezete kimondja (Seneviratne et al., 2021):

A szélsőségek megfigyelt változásainak bizonyítékai és azok emberi befolyásnak való oktulajdonítása (beleértve az üvegházhatású gázok és aeroszolok kibocsátását, valamint a földhasználat változásait) az AR5 óta megerősödött, különösen a szélsőséges csapadék, az aszályok, a trópusi ciklonok és az összetett szélsőségek (így a száraz/forró események és a tüzesetek) esetében. Néhány közelmúltbeli forró szélsőséges esemény rendkívül valószínűtlen lett volna az éghajlati rendszerre gyakorolt emberi befolyás nélkül.

Ezzel szemben, ahogy a 8.5. szakaszban is megjegyeztük, a WG1 12. fejezete (12.12. táblázat) más képet fest – feltehetően a két fejezethez tartozó különböző szerzőcsoportok szakértői eltérő következtetésekre jutottak (Ranasinghe, 2021):

- Nagy valószínűséggel növekszik a szélsőséges hőség eseményszáma a trópusi régióban, ahol a megfigyelések lehetővé teszik a trendbecslést, és a közepes földrajzi szélességek legtöbb régiójában, valamint közepes valószínűséggel máshol.
- Közepes valószínűséggel csökken a szélsőséges hideg eseményszám Ausztráliában, Afrikában és Dél-Amerika északi részének nagy részén, ahol a megfigyelések lehetővé teszik a trendbecslést.
- Nincs bizonyíték arra, hogy a történelmi időszakban megváltozott volna a folyók áradása, a heves csapadék, az aszály, a tüzesetek, a heves szélviharok és a trópusi ciklonok előfordulása.

Bár a szélsőséges időjárási eseményekben bekövetkező változások észlelésének és azok oktulajdonításának általános kérdése továbbra sem egyértelmű, az ezen a területen végzett tevékenységek nagy része az egyes szélsőséges időjárási események oktulajdonítására vonatkozik. A szélsőséges események oktulajdonításával kapcsolatos legnagyobb erőfeszítést a World Weather Attribution (WWA; worldweatherattribution.org), egy nemzetközi kutatási kezdeményezés fejti ki. Céljuk annak elemzése, hogy az éghajlatváltozás hogyan befolyásolja a szélsőséges időjárási események valószínűségét és intenzitását. Megközelítésük az, hogy regionális klímamodellek nagyméretű együtteseit használják fel arra, hogy összehasonlítsák a mai éghajlaton bekövetkező eseményeket egy iparosodás előtti, emberi befolyás nélküli ellentmondásos (kontrafaktuális) éghajlaton bekövetkező eseményekkel.

A WWA kiemelkedő nyilvános jelenlétet tanúsít a szélsőséges időjárás és az éghajlatváltozás közötti kapcsolat terén, sajtóközleményei a nyilvános és politikai vitákban jelentős figyelmet kapnak. A WWA lektorálatlan eredményeinek széles körű népszerűsítése, a peres eljárásokban hasznosítható elemzések alakításának nyílt elismerése, valamint módszertani kihívásai azonban vitákat váltottak ki, a kritikusok pedig megkérdőjelezzik következtetéseik megalapozottságát és pártatlanságát (Pielke Jr. 2024). Ezen problémák ellenére a WWA munkája továbbra is befolyásolja az éghajlattudományi és médiabeli narratívákat. A megközelítéssel kapcsolatos technikai kritikák közé tartozik a formális észlelési folyamat hiánya; az a hallgatóságos feltételezés, hogy az ipari forradalom utáni felmelegedés 100 százalékát üvegházhatású gázok okozzák; valamint a belső éghajlati változékonyság megfelelő figyelembevételének elmulasztása.

Mivel az EEA témaköre viszonylag új, a szakértői szakirodalomban számos alapvető módszertani kérdés még nem rendeződött. Fontos kihívást jelent az adatok hiánya. A szélsőséges események ugyanis definíció szerint ritkák. Számos, szélsőséges eseménytípust elemző vizsgálat

(beleértve az Egyesült Államok Nemzeti Értékelő Jelentéseit is) csak az 1950 vagy az 1970 óta gyűjtött adatokat értékeli. Azonban, ahogyan a 6. fejezetben is hangsúlyoztuk, az Egyesült Államok történelmének számos legsúlyosabb szélsőséges időjárási és éghajlati eseménye a 20. század első felében vagy azt megelőzően (pl. a 19. század elején) történt. És ha paleoklíma-rekonstrukciókat veszünk figyelembe, nagyon nehézé válik egy esemény számára, hogy átlépje a természetes változékonyságtól elvárható akármekkora küszöbértékeket, különösen, ha egy ésszerű méretű földrajzi régiót veszünk figyelembe.

Egy másik kihívás a vizsgált esemény meghatározása. A statisztikában és az ökonometriában régóta létezik olyan szakirodalom, amely a kiugró értékeket tartalmazó adatok elemzésének kihívásairól szól. A probléma azért merül fel, mert egy adatsor egy valószínűségi eloszlást hoz létre, amely meghatározza a megfigyelések várható tartományát. Ha kiugró értéket figyelünk meg, az arra utalhat, hogy az adateloszlást kiváltó mögöttes folyamat megváltozott (ami az időjárási kontextusban azt jelentené, hogy éghajlatváltozást észleltek), vagy hogy az mögöttes folyamatnak több állapota van, amelyek mindegyikének eltérő a valószínűségi eloszlása, ebben az esetben egy kiugró érték megfigyelése egyszerűen azt jelenti, hogy átmenetileg egy másik rállapotban voltunk, de maga a rendszer változatlan maradt. Ha egy idősor csak egyetlen kiugró eseményt tartalmaz a sorozat végén, akkor nem lehet meghatározni, hogy melyik modell a helyes (Chen és Liu 1993). Például létezhet egy „szokásos” időjárási állapot, amely egy adott tengerparti régióban a nyári nappali maximumok eloszlását eredményezi, és egy második, ún. „hőhullám”-állapot, amely akkor lép be, amikor egy szárazföldi blokkoló esemény következik be, ami 15°C-kal magasabb középhőmérséklet-eloszlást eredményez, mint az első. Egy olyan nap, amelynek hőmérséklete 13°C-kal magasabb a normálnál, vagy extrém hőanomália lenne az első állapotban, vagy némileg hűvös esemény a másodikban, és ebben az esetben statisztikai alapon nincs mód arra, hogy megtudjuk, melyik nézet a helyes.

Visser és Petersen (2012), valamint Sardeshmukh et al. (2015) is rámutatnak, hogy a egymástól eltérő eloszlások egyformán jól illeszkedhetnek a megfigyelt adatokhoz, de egy adott időjárási esemény valószínűségére vonatkozóan nagyon eltérő következményekkel járhatnak. Visser és Petersen azzal érvelnek, hogy a szélsőséges időjárási elemzések mély bizonytalanságaira való tekintettel kerülni kell az egyes események és a globális klímaváltozás közötti összefüggés megállapítását. Továbbá, egyetlen kiugró érték léte egy adatsor végén felveti azt a problémát, hogy az események valószínűségének becslése torzított lesz, függetlenül attól, hogy a kiugró értéket befoglaljuk-e vagy sem (Barlow et al., 2020). Az torzítás kiküszöbölésére szolgáló módszereket még nem dolgozták ki, ami arra késztette egyes szakértőket (pl. Miralles és Davison 2023), hogy azt állítsák, hogy olyan helyzetekben, ahol egy adatsor egyetlen szélsőséges eseményt tartalmaz a végén, a szélsőséges esemény visszatérési időszakának becslése annyira torzított és bizonytalan lesz, hogy azt teljesen el kell kerülni. Egy esettanulmányt közlünk egy nemrégiben az Egyesült Államokban lezajlott, nagy hatású szélsőséges eseményről, hogy bemutassuk azokat a kihívásokat és kétértelműségeket, amelyekkel a szélsőséges időjárási események gyakoriságának és intenzitásának az antropogén felmelegedésnek való hozzárendelése (oktalajdonítása) jár.

8.6.1 Esettanulmány – az 2021-es hőhullám Észak-Amerika nyugati részén

Észak-Amerika nyugati felén 2021-ben bekövetkezett hőhullám egy szélsőséges esemény volt, amely 2021 júniusának végén a térség nagy részét érintette. Felszínhőmérséklet-rekordok dőltek meg Portlandben, Oregonban (41°C; korábbi rekord 40°C) és Seattle-ben, Washingtonban (40°C; korábbi rekord 40°C) (Mass et al., 2024).

A WWA csapata elemzésével nemzetközi címlapokra került, amely a következő attribúciós állításokat tartalmazta (WWA, 2021; Philip et al., 2022):

- Megfigyelések és modellezés alapján ennek a hőhullámnak a bekövetkezése gyakorlatilag lehetetlen lett volna ember okozta klímaváltozás nélkül.
- A becslések szerint a mai éghajlaton az esemény előfordulása körülbelül 1000 évente egy.

- Az esemény legalább 150-szer ritkább lett volna ember okozta klímaváltozás nélkül.
- E hőhullám körülbelül 2°C-kal melegebb volt, mint amilyen az ipari forradalom kezdetén lett volna (amikor a globális átlaghőmérséklet 1,2°C-kal hidegebb volt, mint ma).

Az első állítás fontos ellentmondása azonban az, hogy más kutatók a történelmi időjárási adatokból arra a következtetésre jutottak, hogy bár a megfigyelt nagyságrendű hőhullám gyakorlatilag lehetetlen antropogén klímaváltozás nélkül, *természetes klímaváltozás esetén is* gyakorlatilag lehetetlen. Bercos-Hickey (2022) megjegyezte, hogy „ezek a hőmérsékletek gyakorlatilag lehetetlenek voltak bármilyen korábban tapasztalt meteorológiai körülmény között, globális felmelegedéssel vagy anélkül”. McKinnon és Simpson (2022) kijelentették, hogy „a legvalószínűbb magyarázat továbbra is az, hogy az időjárási esemény maga volt a 'balszerencse'.” A 2023-as oregoni klímaértékelés (Fleischman, 2023) arra a következtetésre jutott, hogy a hőkupola klímaváltozás nélkül is kialakult volna, és „nincs bizonyíték arra, hogy a hőkupolát előidéző időjárási jellemzők rendkívül szokatlan kombinációját a klímaváltozás valószínűbbé tette volna, továbbá a klímamodellek nem vetítik előre a magasnyomású hátságok gyakoriságának növekedését a Csendes-óceán északnyugati részén” (Fleischman, 2023, 49. o.).

Mass et al. (2024) összesítik a hőhullámhoz vezető összetett események közelítő sorrendjét. A troposzféra középső részén rekordmagasságú hátság húzódott a Csendes-óceán északnyugati térségében, amit a nyugati Csendes-óceánban zajló trópusi zavar kényszerített ki. Ez rekordmagas közép-troposzférabeli hőmérsékleteket, az alsó légkörben erős süllyedést, alacsonyszintű keleti áramlást okozott, amely a regionális terepen lefelé irányuló felmelegedést és a hűvösebb tengeri levegő eltávolítását eredményezte, valamint egy közeledő alacsony szintű vályút, amely fokozta a lefelé irányuló áramlást. Az esemény a maximális napsugárzás és a normálisnál szárazabb talajnedvesség idején történt. Egy történetiszálas megközelítést alkalmazva Mass et al. úgy értékelte, hogy a Csendes-óceán északnyugati részén nem volt megfigyelhető aszály és talajszáradási tendencia; nincs bizonyíték arra, hogy a globális felmelegedés erősebb magasnyomású gerinceket eredményezne, és nem figyeltek meg hőhullám- vagy rekordhőmérséklet-tendenciáját a régióban. Arra a következtetésre jutottak, hogy bár az antropogén felmelegedés akár 2°F-kal is hozzájárulhatott az esemény nagyságrendjéhez, kevés bizonyíték van arra, hogy az üvegházhatású gázok növekedése tovább erősítette volna az eseményt.

Bercos-Hickey et al. (2022) statisztikai elemzést végzett a hőhullám modellalapú attribúciós vizsgálatáról. Mivel az esemény nagyon kiugró érték, és messze meghaladja a történelmi adatokból illesztett általánosított szélsőérték-eloszlások határait, arra a következtetésre jutottak, hogy a visszatérési időkre, az esemény nagyságának és gyakoriságának mennyiségi változásaira, valamint a szélsőséges hőmérsékletek valószínűségére vonatkozó becslések, amelyeket a WWA szolgáltatott, nem pontosak, és alacsony megbízhatóságúnak kell értelmezni őket. Azt találták, hogy a regionális éghajlati modellek együttesét használó utólagos attribúciós módszerek, kombinálva Pearl (2009) ok-okozati következtetéseivel, korlátozott és feltételes információkat képesek szolgáltatni az emberi befolyás nagyságrendjéről erre a hőhullámra – egy szigorúbb becslést adtak, miszerint az emberi tevékenységek ~1,4–1,8 °F-os növekedést okoztak a napi maximumhőmérsékletekben.

Zeder et al. (2023) szintén arra a következtetésre jutott, hogy a Philip et al. (2022, a WWA elemzése) által alkalmazott módszerek hajlamosak eltúlozni a szélsőséges hőhullámok ritkaságát, ami a klímaváltozás hőhullám-eseményre gyakorolt hatásának elfogult észleléséhez vezet: „A megfigyelt szélsőséges hőhullám-események visszatérési időszakának túlbecslésére való hajlam azt a benyomást táplálhatja, hogy a látszólag lehetetlen hőhullám-szélsőségek jelenleg példátlan ütemben csoportosulnak.”

A 2021-es hőhullám egy ritka és példa nélküli összetett időjárási esemény volt, amely akár 9°F-kal is megdöntötte az évszázados hőmérsékleti rekordokat. Míg a WWA-csapat világszerte nyilvánosságot kapott az antropogén klímaváltozást okoló gyors állításai közzétételéhez, a későbbi

lektorált elemzések kimutatták, hogy az eseményt ritka meteorológiai körülmények okozták, amelyeket a globális felmelegedés nem tett valószínűbbé.

Hivatkozások

- Allen, M. R., & Tett, S. F. B. (1999). Checking for model consistency in optimal fingerprinting. *Climate Dynamics*, 15(6), 419–434. <https://doi.org/10.1007/s003820050291>
- AR4: Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- AR5: Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- AR6: Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- Arthun, M, RCJ Willis, HL Johnson, L Chafik, HR Langehaug (2021) Mechanisms of Decadal North Atlantic Climate Variability and Implications for the Recent Cold Anomaly. *Journal of Climate*, Vol 34
- Balcombe, Kevin, Iain Fraser and Abhijit Sharma (2019) Is radiative forcing cointegrated with temperature? A further examination using a structural time series approach.” *Management of Environmental Quality* 30(5) DOI 10.1108/MEQ-12-2018-021.
- Barlow, Anna Maria, Chris Sherlock and Jonathan Tawn (2020) Inference for Extreme Values Under Threshold-Based Stopping Rules. *Journal of the Royal Statistical Society Series C* August 2020, Pages 765–789, <https://doi.org/10.1111/rssc.12420>
- Bednarz, EW, AH Butler, X Wang, Z Zhou, W Yu, G Stenchikov, M Toohey, Y Zhu (2025) Indirect climate impacts of the Hunga eruption. Preprint, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1970>
- Bercos-Hickey, E., et al. (2022). Anthropogenic contributions to the 2021 Pacific Northwest heatwave. *Geophysical Research Letters*, 49(23), e2022GL099396. <https://doi.org/10.1029/2022GL099396>
- Bokuchava, DD and VV Semenov (2021) Mechanisms of the early 20th century warming in the Arctic. *Earth-Science Reviews*, 222, 103820
- Chatzistergos, T., Krivova, N. A., & Yeo, K. L. (2023). Long-term changes in solar activity and irradiance. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 252, 106150. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106150>
- Chen, C., & Liu, L.-M. (1993). Joint estimation of model parameters and outlier effects in time series. *Journal of the American Statistical Association*, 88(421), 284–297. <http://www.jstor.org/stable/2290724>
- Chen, H, SX Chen and M Mu (2023) A statistical review on the optimal fingerprinting approach in climate change studies. *Climate Dynamics* 62:1439-1446 <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-023-06975-5>
- Chylek, P., et al. (2016). The role of Atlantic Multi-Decadal Oscillation in the global mean temperature variability. *Climate Dynamics*, 47(9–10), 3271–3279. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3025-7>
- Connolly, R., et al. (2021). How much has the sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 21(6), 131. <https://doi.org/10.1088/1674-4527/21/6/131>
- Cramer, W., et al. (2014). Detection and attribution of observed impacts. In C. B. Field et al. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects* (pp. 979–1037). Cambridge University Press.

- Dagsvik, JK SH Moen (2023) To what extent are temperature levels changing due to greenhouse gas emissions? Statistics Norway Discussion Paper 1007 September 2023
- Dagsvik, JK, M Fortuna and SH Moen (2020) How Does Temperature Vary Over Time?: Evidence on the Stationary and Fractal Nature of Temperature Fluctuations. *Journal of the Royal Statistical Society Series A: Statistics in Society*, Volume 183, Issue 3, June 2020, Pages 883–908, <https://doi.org/10.1111/rssa.12557>
- Davidson, James E.H., David B. Stephenson and Alemtsehai A. Turasie (2015) Time series modeling of paleoclimate data *Environmetrics* 27(1) <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/env.2373>
- Dergiades, T., R.K. Kaufmann and T. Panagiotidis (2016). Long-run changes in radiative forcing and surface temperature: The effect of human activity over the last five centuries. *Journal of Environmental Economics and Management* 76:67—85. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0095069615000911>
- England, Mark, Lorenzo M Polvani, James A Screen, et al (2025). Surprising, but not unexpected, multi-decadal pause in Arctic sea ice loss. ESS Open Archive. March 29, 2025.
- Fleishman, E., editor. (2023). Sixth Oregon Climate Assessment. Oregon Climate Change Research Institute, Oregon State University, Corvallis, Oregon. <https://blogs.oregonstate.edu/occri/oregon-climate-assessments>
- Forster et al. (2024) “Indicators of Global Climate Change 2024: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence” *Earth System Science Data* 17(6) <https://doi.org/10.5194/essd-17-2641-2025>
- Frajka-Williams, E, C Beaulieu, Aurelie Duchez (2017) Emerging negative Atlantic Multidecadal Oscillation index in spite of warm subtropics. *Scientific Reports*, 7:11224
- Goessling, Helge F. Thomas Rackow and Thomas Jung (2024) Recent global temperature surge intensified by record-low planetary albedo. *Science* Vol 387, Issue 6729 pp. 68-73 <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.adq7280>
- Gulev, S. K., et al. (2021). Changing state of the climate system. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 287–422). Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Hansen J and P Karecha (2025) Large cloud feedback confirms high sensitivity. <https://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2025/CloudFeedback.13May2025.pdf>
- Hegerl, G. C., et al. (2007). Understanding and attributing climate change. In S. Solomon et al. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 663–745). Cambridge University Press.
- Hegerl, GC, S Bronniman, A Schurer et al. (2017) Early 20th century warming: Anomalies, causes and consequences. *WIREs Climate Change*, DOI: 10.1002/wcc.522
- Hegerl, GC, S Bronniman, T Cowan (2019) Causes of climate change over the historical record. *Environmental Research Letters*, 14, 123006
- Hodnebrog, Ø et al. (2024), Recent reductions in aerosol emissions have increased Earth’s energy imbalance. *Communications Earth and Environment* 5, 166 (2024). doi:10.1038/s43247-024-01324-8
- Houghton, J. T., et al. (Eds.). (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1–881). Cambridge University Press.
- <https://mailchi.mp/caa/large-cloud-feedback-confirms-high-climate-sensitivity>

- Kravtsov, S., Westgate, A., & Gavrilov, A. (2024). Global-scale multidecadal variability in climate models and observations, part II: The stadium wave. *Climate Dynamics*, 62, 10281–10306. <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07451-4>
- Kuchar, A., Sukhodolov, T., Chiodo, G., Jörimann, A., Kult-Herdin, J., Rozanov, E., and Rieder, H. H. (2025): Modulation of the northern polar vortex by the Hunga Tonga–Hunga Ha'apai eruption and the associated surface response, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25, 3623–3634, <https://doi.org/10.5194/acp-25-3623-2025>.
- Lewis, Nicholas (2023) “Objectively Combining Climate Sensitivity Evidence,” *Climate Dynamics* 61, no. 9–10 (2023): 3155–3163, <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06398-8>.
- Lockwood, M. (2012). Solar influence on global and regional climates. *Surveys in Geophysics*, 33(3–4), 503–534. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9181-3>
- Loeb, N. G. et al. (2019) Decomposing Shortwave Top-of-Atmosphere and Surface Radiative Flux Variations in Terms of Surface and Atmospheric Contributions. *Journal of Climate* 32(16), 5003-5019 (2019). doi:10.1175/JCLI-D-18-0826.1
- Loeb, N., S-H Ham, RP Allen, TJ Thorsen, B Meyssignac, S Kato, GC Johnson, JL Lyman (2024) Observational Assessment of Changes in Earth’s Energy Budget since 2000. *Surveys in Geophysics*, 45, 1757-1783
- Mass, C., et al. (2024). The Pacific Northwest heat wave of 25–30 June 2021: Synoptic/mesoscale conditions and climate perspective. *Weather and Forecasting*, 39(2), 275–291. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-23-0154.1>
- Matthes, K., et al. (2017). Solar forcing for CMIP6 (v3.2). *Geoscientific Model Development*, 10(6), 2247–2302. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2247-2017>
- McKinnon, K. and I. Simpson (2022) How Unexpected Was the 2021 Pacific Northwest Heatwave? *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL100380. <https://doi.org/10.1029/2022GL100380>
- McKinnon, K. and I. Simpson (2022) How Unexpected Was the 2021 Pacific Northwest Heatwave? *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL100380. <https://doi.org/10.1029/2022GL100380>
- McKittrick, R. (2021). Checking for model consistency in optimal fingerprinting: A comment. *Climate Dynamics*, 58(1–2), 405–411. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05913-7>
- McKittrick, R. (2023). Total least squares bias in climate fingerprinting regressions with heterogeneous noise variances and correlated explanatory variables. *Environmetrics*, 35(2), e2835. <https://doi.org/10.1002/env.2835>
- McKittrick, Ross R (2022) On the choice of TLS versus OLS in climate signal detection regression. *Climate Dynamics* 10.1007/s00382-022-06315-z
- McKittrick, Ross R (2025) Consistent Climate Fingerprinting. *Climate Dynamics* forthcoming preprint available at www.rossmckittrick.com
- McLean, J.D., C. R. de Freitas, and R. M. Carter, (2009) “Influence of the Southern Oscillation on Tropospheric Temperature,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 114, no. D14 (July 23, 2009): D14104, <https://doi.org/10.1029/2008JD011637>.
- Miralles, Ophélie and Anthony Davison (2023) Timing and spatial selection bias in rapid extreme event attribution. *Weather and Climate Extremes* 41 100584 <https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100584>
- Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, et al (2013): Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Nissan, Hannah, Lisa Goddard, Erin Coughlan de Perez, et al. (2019) On the use and misuse of climate change projections in international development. *Wires Climate Change* 14 March 2019 <https://doi.org/10.1002/wcc.579>
- Palmer, Tim N and Bjorn Stevens (2019) The scientific challenge of understanding and estimating climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116 (49) 24390-24395 <https://doi.org/10.1073/pnas.1906691116>
- Pearl, J. (2009). *Causality*. Cambridge University Press.
- Philip, S. Y., et al. (2022). Rapid attribution analysis of the extraordinary heatwave on the Pacific coast of the U.S. and Canada June 2021. *Earth System Dynamics*, 13(4), 1689–1713. <https://doi.org/10.5194/esd-13-1689-2022>
- Pielke Jr., Roger (2024) *Weather Attribution Alchemy*. Substack essay <https://rogerpielkejr.substack.com/p/weather-attribution-alchemy>
- Ranasinghe, R., Ruane, A. C., Vautard, R., Arnell, N., Coppola, E., Cruz, F. A., ... Zaaboul, R. (2021). Chapter 12: Climate change information for regional impact and for risk assessment. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1767–1926). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.014>
- Razzak, Weshah A. (2022). "The Econometrics of Global Warming," *Journal of Economics and Econometrics*, vol. 65(2), pages 13-47.
- Sardeshmukh, P. D., Compo, G. P., & Penland, C. (2015). Need for caution in interpreting extreme weather statistics. *Journal of Climate*, 28(23), 9166–9187. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0020.1>
- Scafetta, N. (2013). Discussion on climate oscillations: CMIP5 general circulation models versus a semi-empirical harmonic model based on astronomical cycles. *Earth-Science Reviews*, 126, 321
- Scaffeta, Nicola (2021) "Reconstruction of the Interannual to Millennial Scale Patterns of the Global Surface Temperature," *Atmosphere* 12, no. 2: 147, <https://doi.org/10.3390/atmos12020147>
- Schmidt, G. (2024) Climate models can't explain 2023's huge heat anomaly — we could be in uncharted territory. *Nature* 627, 467. <https://www.nature.com/articles/d41586-024-00816-z>
- Schmutz, Werner K. (2021) "Changes in the Total Solar Irradiance and Climatic Effects," *Journal of Space Weather and Space Climate* 11: 40, <https://doi.org/10.1051/swsc/2021016>.
- Seneviratne, S. et al. (2021) "Chapter 11: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate." In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, et al., 1513–1766. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>.
- Solanki, S.K. et al. (2004), "Unusual Activity of the Sun during Recent Decades Compared to the Previous 11,000 Years," *Nature* 431, no. 7012 (October 28, 2004): 1084–1087, <https://doi.org/10.1038/nature02995>.
- Stefani, Frank (2021) "Solar and Anthropogenic Influences on Climate: Regression Analysis and Tentative Predictions," *Climate* 9, no. 11 (November 3, 2021): 163, <https://doi.org/10.3390/cli9110163>.
- Thompson, DJW, JM Wallace, JJ Kennedy, PD Jones (2010) An abrupt drop in Northern Hemisphere Sea Surface Temperature around 1970. *Nature*, 467, 444-447
- Tokinaga, H, SP Xie, and H Mukougawa (2017) Early 20th century Arctic warming intensified by Pacific and Atlantic multidecadal variability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114, 6227-6233 <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1615880114>

- Tung, Ka-Kit and Jiansong Zhou (2013) “Using Data to Attribute Episodes of Warming and Cooling in Instrumental Records,” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, no. 6 (January 23, 2013): 2058–2063, <https://doi.org/10.1073/pnas.1212471110>.
- Usoskin, I.G., S. K. Solanki, and G. A. Kovaltsov (2007) “Grand Minima and Maxima of Solar Activity: New Observational Constraints,” *Astronomy & Astrophysics* 471, no. 1 (June 6, 2007): 301–309, <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077704>.
- Velasco Herrera, V.M., B. Mendoza, and G. Velasco Herrera (2015) “Reconstruction and Prediction of the Total Solar Irradiance: From the Medieval Warm Period to the 21st Century,” *New Astronomy* 34 (January 2015): 221–233, <https://doi.org/10.1016/j.newast.2014.07.009>.
- Visser, H. and A.C. Petersen (2012) Inferences on weather extremes and weather-related disasters: a review of statistical methods *Climates of the Past* 8, 265–286 <https://cp.copernicus.org/articles/8/265/2012/cp-8-265-2012.pdf>
- World Weather Attribution (2021) “Western North American Extreme Heat Virtually Impossible without Human-Caused Climate Change.” July 7, 2021. <https://www.worldweatherattribution.org/western-north-american-extreme-heat-virtually-impossible-without-human-caused-climate-change/>.
- Yuan, et al. (2024) Abrupt reduction in shipping emission as an inadvertent geoengineering termination shock produces substantial radiative warming. *Communications Earth and Environment* 5, 281 (2024). doi:10.1038/s43247-024-01442-3
- Zeder, J., Sippel, S., Pasche, O. C., Engelke, S., & Fischer, E. M. (2023). The effect of a short observational record on the statistics of temperature extremes. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL104090. <https://doi.org/10.1029/2023GL104090>

III. RÉSZ: HATÁSOK AZ ÖKOSZISZTÉMÁKRA ÉS A TÁRSADALOMRA

9 KLÍMAVÁLTOZÁS ÉS AZ USA MEZŐGAZDASÁGA

Fejezet-összefoglaló

A legutóbbi évtizedek során számos bizonyíték gyűlt össze arra vonatkozóan, hogy a növekvő CO₂-szint előnyös a növények (így a mezőgazdasági növények) számára, és hogy a CO₂ által kiváltott felmelegedés az Egyesült Államok mezőgazdasága számára összességében előnyös. A légköri CO₂-szint emelkedése az összes főbb amerikai növényfaj termését növelte. Joggal feltételezhető, hogy az éghajlatváltozás összességében semleges vagy előnyös, és az amerikai mezőgazdaság legnagyobb része számára továbbra is az marad.

9.1 Ökonometriai elemzések

Az mezőgazdaságra gyakorolt klímaváltozási hatások ökonometriai elemzése az a törekvése, hogy a hosszú távú terméshozam-változásokra adott információkat a hőmérséklet- és csapadékváltozásokra adott válaszként, a gazdálkodók alkalmazkodási viselkedésére vonatkozó feltételezések alapján összegezze. Az egyik módszer a mezőgazdasági földterületek értékváltozásaira összpontosít. Az indoklás az, hogy ha az éghajlatváltozás hosszú távú nettó előny a mezőgazdaság számára, akkor azt a mezőgazdasági földterületek magasabb piaci értékének növelésére kell tőkésíteni, és fordítva. Míg az egyes növények profitálhatnak vagy károsodhatnak az éghajlatváltozásból, a gazdálkodók alkalmazkodási válaszait figyelembe véve a mezőgazdasági földterület értéke annak indexét képviseli, hogy a változások várhatóan előnyösek-e vagy sem. Mendelsohn et al. (1994) megvizsgálták a történelmi éghajlatváltozások és a mezőgazdasági földterületek értékének kapcsolatát, és arra a következtetésre jutottak, hogy a globális felmelegedés kismértékben előnyös lenne az amerikai mezőgazdaság számára.

Mendelsohn et al. módszere, amit David Ricardo, a földérték-tanulmányozásban úttörő 19. századi brit közgazdász után ricardói elemzésnek neveztek el, később kritika érte a szerzők részéről, akik azzal érveltek, hogy e módszer nem veszi figyelembe a földértékek közötti különbségeket, amelyek a fix helyhez kötött jellemzőknek tulajdoníthatók, így például a talajminőségnek, valamint a nem éghajlati változásoknak, beleértve a közeli urbanizációt is. Deschênes és Greenstone (2007) a mezőgazdasági profitot vizsgálták a földértékek helyett, és Mendelsohn et al. (1994) következtetéseire hasonló következtetésekre jutottak, nevezetesen arra, hogy a múltbeli éghajlatváltozások viszonylag csekély hatással voltak a gazdaságok jövedelmezőségére, és hogy a felmelegedés összességében valószínűleg csekély előnyökkel járna az amerikai mezőgazdasági ágazat számára. A kritikusokkal folytatott későbbi eszmecsere azonban arra készítette őket (Deschênes és Greenstone 2012), hogy felülvizsgálják következtetéseiket, és a klímafelmelegedés miatt az amerikai mezőgazdaságban potenciálisan nagy veszteségeket jósoljanak.

Burke és Emerick (2016) az 1980 és 2000 közötti hőmérséklet-ingadozásokat vizsgálták, és azzal érveltek, hogy a gazdák nem voltak képesek úgy alkalmazkodni a hőmérséklet-változásokhoz, mint ahogyan azt a ricardói módszer feltételezi, és hogy a klímaváltozás nagy negatív hatással lenne a kukorica- és szójahozamokra. Schlenker és Roberts (2009) hasonlóképpen érveltek amellelt, hogy a múltbeli felmelegedésből származó hozamnövekedés nem fog átragadni a jövőbe, és a kukorica- és szójahozamok meredeken csökkenni fognak ebben az évszázadban az éghajlatváltozás miatt.

Két újabb tanulmány azzal érvelt, hogy az ilyen pesszimista eredmények nem megbízhatóak. Ortiz-Bobea (2019) szerint a földértékek összesítik a mezőgazdasági és nem mezőgazdasági hatásokat, és az utóbbiakat ki kell szűrni. Létrehozott egy adathalmazt, amely a mezőgazdasági tevékenység készpénzes bérleti díjait használja a földérték mérésére, kifejezetten a mezőgazdasági tevékenység esetében. Míg a földérték-modell a klímafelmelegedés miatti jövőbeni veszteségeket vetített fel, ugyanez a modell, amelyet készpénzes bérleti díjakkal becsültek, nem ezt tette, ami arra a vezettet, hogy a szerző arra a következtetésre jutott, hogy a pesszimista eredmények a mezőgazdasági tevékenység hozamának pontatlan mérésének következményei. Bareille és Chakir (2023) egy nagy adatbázist állított össze a franciaországi mezőgazdasági eladási árakról olyan ingatlanok esetében,

amelyeket 1996 és 2019 között kétszer adtak el. Hagyományos ökonometria modellezéssel meg tudták ismételni a felmelegedés mezőgazdasági földértékekre gyakorolt negatív hatásait mutató pesszimista eredményeket. De kihasználva az ismételt értékesítési adatokat, amelyek információt nyújtanak a földárak helyspecifikus változásairól, úgy találták, hogy az eredmények fordítottak, és arra utalnak, hogy a klímaváltozás nagyon előnyös lesz a francia mezőgazdaság számára. A szerzők arra a következtetésre jutottak, hogy az alkalmazkodást figyelembe véve a melegebb éghajlat a korábban becsültnél két-húszszor nagyobb pozitív előnyökkel járna a francia mezőgazdaság számára. Átlagosan, teljes alkalmazkodás esetén úgy találták, hogy a közepes RCP4.5 forgatókönyv szerinti klímaváltozás 2100-ra megduplázza a francia termőföld értékét.

Mindezek a tanulmányok egyik fő hiányossága azonban, hogy kihagyják a CO₂-trágyázás szerepét. A klímaváltozást, ahogyan az jelen jelentéshez kapcsolódik, az üvegházgáz-kibocsátás, főként a CO₂ okozza. A fent említett ökonometria elemzések csak a hőmérséklet- és csapadékváltozásokra összpontosítanak, és nem veszik figyelembe a további CO₂ jótékony növekedési hatását, amely ezeket hajtja. Amint a 2. fejezetben kifejtettük, a CO₂ a növények növekedésének egyik fő mozgatórugója, így ez a mulasztás az elemzést a klímaváltozás mezőgazdaságra gyakorolt előnyeinek alábecsülése felé torzítja.

9.2 A CO₂-dúsulás terepi és laboratóriumi vizsgálatai

A CO₂ növény-növekedésre gyakorolt hatását többek között a „szabad levegős dúsítási kísérletek” (FACE-parcellák) segítségével vizsgálták, amelyek során a növényeket körülvevő mezőkön kis CO₂-forrásokat helyeznek el, és rögzítik a növekedési reakciót a megnövekedett CO₂-szintre változó időjárási körülmények között. Ainsworth et al. (2020) körülbelül 250 ilyen vizsgálat eredményeit foglalja össze. Úgy találták, hogy a CO₂ 200 ppm-es emelése átlagosan a C3 növények terméshozamában 18 százalékos növekedést eredményezett. A C4 növények főként aszályos körülmények között mutattak előnyöket.

A FACE-parcella-kísérletek mellett több ezer laboratóriumi kísérletet végeztek a CO₂ hatásairól mindenféle növény növekedésére. Itt áttekintünk néhány eredményt a kulcsfontosságú amerikai mezőgazdasági növényekről.

Szója

A megnövekedett CO₂-koncentráció szójabab (*Glycine max* (L.) Merr.) növényekre gyakorolt hatásáról a kínai Huang-Huai-Hai síkság vízhiányos régiójában végzett tanulmányok kimutatták, hogy a megnövekedett CO₂-koncentráció javította a fotoszintézis sebességét, a vízfelhasználás hatékonyságát és a növekedést Li (2013) mind normál, mind aszályos körülmények között. A CO₂Science.org weboldal 108 publikált kísérletről számol be 1985 és 2019 között, amelyekben a szójababot dúsított CO₂-szintnek tették ki. Egy +300 ppm-es általános skálára átszámítva az átlagos növekedési előny +50,9 százalék volt. Tíz tanulmány számolt be +600 ppm CO₂-dúsításról is, amely átlagosan 90,3%-kal növelte a fotoszintézist.

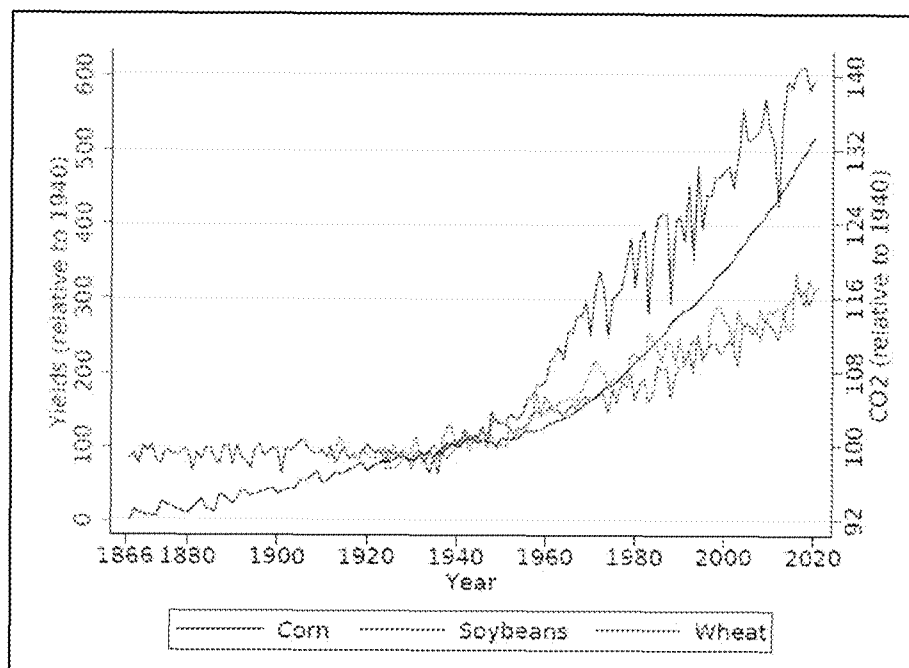
Kukorica

A CO₂Science.org weboldal 28 publikált kísérletről számol be 1983 és 2018 között, amelyekben kukoricát (*Zea mays* L.) tettek ki dúsított CO₂-szintnek. +300 ppm általános skálára átszámítva az átlagos növekedési előny +23,7 százalék volt. A kukorica a megnövekedett CO₂-szint mellett a szárazságtűrésből is profitál. Egy kísérleti tanulmány (Allen Jr., 2011) a növényeket napsütötte, szabályozott környezetű kamrákban 360 ppm (környezeti) és 720 ppm (emelt) CO₂-szint mellett vízstressznek tették ki. A szárazságstressz 41 százalékos növekedésvesztést okozott környezeti CO₂-szint mellett, de csak 13 százalékos veszteséget emelt CO₂-szint mellett.

Búza

A CO₂Science.org weboldal 92 publikált kísérletről számol be 1983 és 2020 között, amelyekben a közönséges búzát (*Triticum aestivum* L.) dúsított CO₂-szintnek tették ki. +300 ppm általános skálára átszámítva az átlagos növekedési előny +67,6 százalék volt. Blandino (2020) megmérte egy „javító”

hibrid búzafajta és szülőfajtáinak terméshozamát és tápértékét megemelt CO₂-szint (+166 ppm) mellett. A jelentések szerint a szemtermés +16 százalékkal nőtt, de a szemfehérje-szint 7 százalékkal csökkent. Azt is megállapították azonban, hogy a különböző búzafajták tápértéke eltérően reagált a megemelkedett CO₂-szintre, így megfelelő fajtaválasztással a termelők olyan búzafajtákat választhattak, amelyek a legjobban élnek a megemelkedett CO₂-szint által jelentett körülményekkel.



9.1. ábra: Az Egyesült Államok átlagos CO₂-szintje és a kukorica, a szója és a búza terméshozamai normalizálódtak, így 1940=100. Forrás: Taylor és Schlenker (2021)

További bizonyítékok

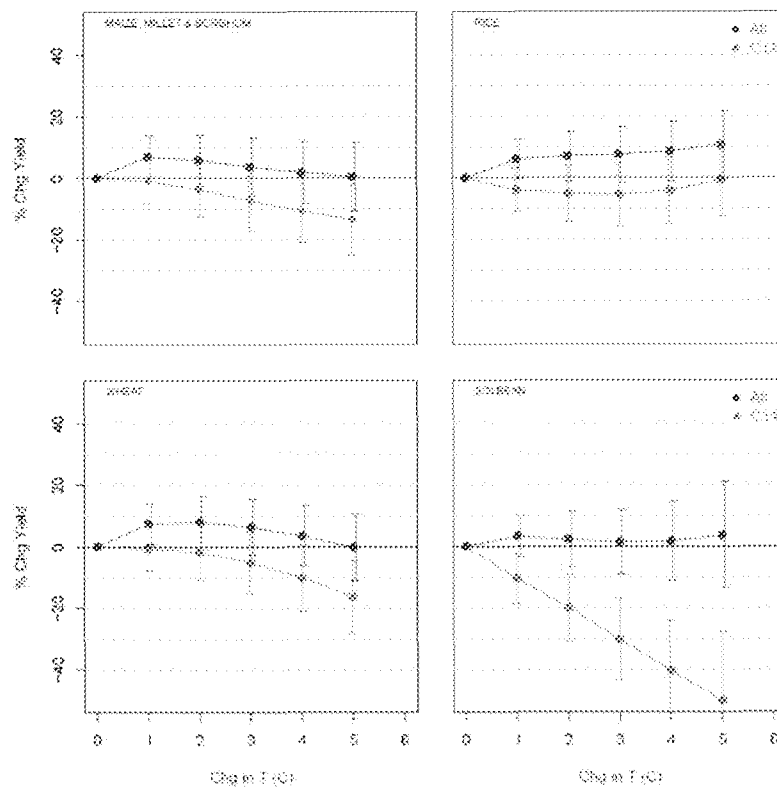
Az Egyesült Államok Nemzeti Gazdaságkutató Irodájának 2021-es jelentése (Taylor és Schlenker 2021) az Egyesült Államokban műholdas mérésekkel megfigyelt kültéri CO₂-szinteket használt fel, amelyekhez megyei szintű mezőgazdasági termelési adatokkal és más gazdasági változókkal illesztettek. Az időjárás, a szennyezés és a technológia hatásainak kiszűrése után a szerzők arra a következtetésre jutottak, hogy a CO₂-kibocsátás 1940 óta 50-80 százalékkal növelte az amerikai növénytermesztést, ami sokkal nagyobb nyereséget eredményezett, mint amennyit korábban FACE-kísérletekkel becsültek. Úgy találták, hogy a CO₂-koncentráció minden ppm-es növekedése 0,5 százalékkal növeli a kukorica, 0,6 százalékkal a szójabab és 0,8 százalékkal a búza terméshozamát.

A növekedési előnyökön túl a többlet CO₂ fokozza a növények szárazsággal szembeni ellenálló képességét. Lásd a 2.1.3. szakaszban található diszkussziót.

9.3 Termésmodellezési metaelemzések

Annak ellenére, hogy bizonyítékok bősége áll rendelkezésre arra, hogy a CO₂ és a CO₂ által kiváltott felmelegedés növény-növekedésre közvetlenül előnyös, az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége (EPA 2023) 2023-ban körülbelül ötszörösre növelte a szén-dioxid társadalmi költségének (SCC) becslését, nagyrészt a klímafelmelegedés okozta globális mezőgazdasági károk nagyon pesszimista 2017-es becslése alapján (Moore et al., 2017). Az EPA által használt két kármodell egyike a 2030-as szubszaharai szelek közel felét a Moore et al. (2017)

elemzése alapján előre jelzett globális mezőgazdasági károknak tulajdonította. Ez a tanulmány különféle éghajlati felmelegedési forgatókönyvek mellett végzett metaanalízist mezőgazdasági növények hozamváltozásait szimulálására. A Moore et al.-féle tanulmány a felmelegedés miatt minden növényfajra és minden régióra vonatkozóan a globális terméshozam csökkenését vetítette előre.



9.2. ábra: Terméshozamok CO₂-indukált éghajlati felmelegedés esetén. Kék: Moore et al. (2017) publikációja szerint. Zöld: a kihagyott adatok figyelembevétele után. Forrás: McKittrick (2025).

McKittrick (2025) újra megvizsgálta a Moore et al. adatbázisát, és megállapította, hogy bár az Moore-ék állítása szerint 1722 tanulmányt fed le, a ezeknek csak a fele (N=862) tartalmazott teljes megfigyelést, így a regresszioanalízishez rendelkezésre álló minta sokkal kisebb volt, mint amit a két tanulmány jelzett. McKittrick megjegyezte, hogy a leggyakrabban hiányzó megfigyelési tételek a környezeti CO₂-változás volt, és megállapította, hogy ezek sok esetben az alapul szolgáló tanulmányokból vagy az eredeti éghajlati forgatókönyv-táblázatokból visszanyerhetők voltak, ezáltal a felhasználható minta méretét 40 százalékkal megnövelte. Az újonnan rendelkezésre álló adatokat tartalmazó terméshozam-előrejelzések jelentősen megváltoztak. Amint a 9.2. ábra mutatja, míg a részleges adatkészlet a felmelegedés hozamcsökkenését sugallta (kék vonalak), a teljes adatkészlet állandó vagy növekvő globális hozamokat jelzett, még 5°C-os felmelegedés esetén is (zöld vonalak).

9.4 A CO₂-trágyázás és a tápanyagvesztés

A bizonyítékok azt mutatják, hogy a CO₂ által kiváltott biomassza-növekedést néha a fehérje és egyéb kulcsfontosságú tápanyagok, például a vas és a cink koncentrációjának csökkenése kíséri (Ebi et al. 2021). Néhány kísérlet kimutatta, hogy a magasabb CO₂-szinttel várhatóan együtt járó emelkedő hőmérséklet ellensúlyozza ezt a veszteséget (Köhler et al. 2019), bár az erre vonatkozó bizonyítékok vegyesek, akárcsak az a bizonyíték, hogy a mai napig megfigyelt tápanyag-hígulás teljes mértékben a magasabb CO₂-szintnek tulajdonítható (Ziska 2022). Ha tápanyag-hígulás következik be a növekvő CO₂-szint mellett, számos adaptív stratégia alkalmazható.

Először is, a mikrotápanyag-tartalom növelésére irányuló szelektív nemesítés (Saltzman et al. 2017) már bevált és költséghatékony agronómiai stratégiának bizonyult (Ebi et al. 2021). A stratégiák jelenthetnek mind hagyományos nemesítést, mind genetikailag módosított szervezeteket. Ez utóbbira példa az aranyrizs, amely megnövelt mennyiségű béta-karotint tartalmaz az A-vitamin az emberi szervezetben való bioszintézisének fokozása érdekében. Az optimális stratégiák helyspecifikusak, mivel növényenként, éghajlatonként és talajtípusonként változnak (Ebi et al. 2021). Másodszor, az élelmiszerek mikrotápanyagokkal való dúsítása már rutinszerű. A folsavat (egy B-vitamin) liszthez és sok más élelmiszerhez adják; jódot adnak az asztali sóhoz, a legtöbb kereskedelmi forgalomban kapható reggeli gabonapelyhet vassal és számos vitaminnal dúsítják stb. Harmadszor, a multivitamin tabletták formájában kapható étrend-kiegészítők olcsók, széles körben elérhetők és rutinszerűen fogyasztják őket.

Az adaptív stratégiákra való támaszkodással kapcsolatos egyik aggodalom az, hogy megvalósíthatók-e az alacsony jövedelmű országokban. A mikrotápanyag-hiány már most is problémát jelent a fejlődő világban, és az étrend-kiegészítők hatékony, alacsony költségű válasznak bizonyultak (Ebi et al. 2021). Azt is meg kell jegyezni, hogy az IPCC magas szintű felmelegedést generáló kibocsátási forgatókönyvei erős jövedelemnövekedést istartalmaznak. Az SSP forgatókönyvek³ azt feltételezik, hogy a 2005-ös szinthez képest a globális egy főre jutó jövedelem 2100-ra legalacsonyabb növekedési esetben (SSP3) megduplázódik, a legmagasabb kibocsátási esetben (SSP5) pedig közel 16-szorosára nő. Ebben a forgatókönyvben még a legszegényebb régiók (Afrika és a Közel-Kelet) egy főre jutó jövedelme is körülbelül 126 000 USD, ami 70 százalékkal magasabb, mint a jelenlegi amerikai egy főre jutó jövedelem (körülbelül 75 000 USD). Következésképpen ugyanazok a forgatókönyvek, amelyekben a CO₂-szint a legnagyobb mértékben növekszik, lényegében a globális szegénység is megszűnik, és ebben az esetben minden ország megengedhetné magának a szükséges étrend-kiegészítőket a mikrotápanyag-hiányok kezelésére, ha annak a szükségessége felmerülne, mert nem orvosolható a mezőgazdasági stratégiákkal.

Összefoglalva, évtizedekre visszamenően bőséges bizonyítékok vannak arra, hogy a növekvő CO₂-szint előnyös a növények, így a mezőgazdasági növények számára, és hogy a CO₂ által kiváltott felmelegedés az Egyesült Államok mezőgazdaságának nettó előnyt jelent. Amennyiben a tápanyagok felhígnak, rendelkezésre állnak enyhítő stratégiák, amelyeket meg kell vizsgálni és a helyi körülményekhez kell igazítani.

Hivatkozások

- Ainsworth, Elizabeth and Stephen P. Long (2020) 30 years of free-air carbon dioxide enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? *Global Change Biology* <https://doi.org/10.1111/gcb.15375>
- Allen Jr, L. K. (2011). Elevated CO₂ increases water use efficiency by sustaining photosynthesis of water-limited maize and sorghum. *Journal of Plant physiology*, 168(16), 1909-1918.
- Bareille, F. and R. Chakir (2023) The impact of climate change on agriculture: A repeat-Ricardian analysis. *Journal of Environmental Economics and Management* 119
- Blandino, M. B. (2020). Elevated CO₂ impact on common wheat (*Triticum aestivum* L.) yield, wholemeal quality, and sanitary risk. *Journal of agricultural and food chemistry*, 68(39), 10574-10585.
- Burke, Marshall and Kyle Emerick (2016) Adaptation to Climate Change: Evidence from US Agriculture. *American Economic Journal: Economic Policy* 8(3) August 2016 106—140 <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/pol.20130025>
- Cheng, L., Zhang, L., Wang, YP. et al. Recent increases in terrestrial carbon uptake at little cost to the water cycle. *Nature Communications* 8, 110 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00114-5>

³ Lásd az összeállítást az Our World in Data oldalon.

- CO2Science.org (undated) Plant growth archive
http://www.co2science.org/data/plant_growth/dry/dry_subject_b.php
- Deryng, D., Elliott, J., Folberth, C. et al. (2021) Regional disparities in the beneficial effects of rising CO2 concentrations on crop water productivity. *Nature Climate Change* 6, 786–790 (2016).
<https://doi.org/10.1038/nclimate2995>
- Deschênes, Olivier and Michael Greenstone (2012) The Economic Impacts of Climate Change: Evidence from Agricultural Output and Random Fluctuations in Weather: Reply to Comment *American Economic Review*. 102, no. 7: 3761-3773. <http://hdl.handle.net/1721.1/82641>
- Ebi, Kristie L, C Leigh Anderson, Jeremy J Hess, et al. (2021) Nutritional quality of crops in a high CO2 world: an agenda for research and technology development. *Environmental Research Letters* 16(6) 064045 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abfcfa>
- Köhler, Iris H., Steven C. Huber, Carl J. Bernacchi, Ivan R. Baxter (2019) Increased temperatures may safeguard the nutritional quality of crops under future elevated CO2 concentrations. *The Plant Journal* 97(5) 872 – 886 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/tpj.14166>
- Li, D. L. (2013). Effects of elevated CO2 on the growth, seed yield, and water use efficiency of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) under drought stress. *Agricultural Water Management*, 129, 105-112.
- McKittrick, Ross R. (2025) Extended Crop Yield Meta-analysis Data do not Support Upward SCC Revision. *Scientific Reports* 15 article 5575 <https://www.nature.com/articles/s41598-025-90254-2>
- Mendelsohn, R., Nordhaus, W. D., & Shaw, D. (1994). The impact of global warming on agriculture: a Ricardian analysis. *The American Economic Review*, Sept 1994 753-771.
- Moore FC, Baldos U, Hertel T, Diaz D (2017) New science of climate change impacts on agriculture implies higher social cost of carbon. *Nature Communications* 8:1607. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01792-x>
- Ortiz-Bobea, Ariel (2019) The role of nonfarm influences in ricardian estimates of climate change impacts on US agriculture. *American Journal of Agricultural Economics*. 102 (3), 934–959.
- Saltzman, Amy, Ekin Birol, Adewale Oparinde et al. (2017) Availability, production, and consumption of crops biofortified by plant breeding: current evidence and future potential. *Annals of the New York Academy of Sciences* Volume 1390, Issue 1
<https://doi.org/10.1111/nyas.13314>
- Schlenker, Wolfram and Michael Roberts (2009) Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106 (37) 15594-15598 <https://doi.org/10.1073/pnas.0906865106>
- Taylor, Charles and Wolfram Schlenker (2023) Environmental drivers of agricultural productivity growth: CO2 fertilization of US field crops. *National Bureau of Economic Research Working paper* 29320, <https://www.nber.org/papers/w29320>
- US Environmental Protection Agency (2023) Supplementary Material for the Regulatory Impact Analysis for the Final Rulemaking, “Standards of Performance for New, Reconstructed, and Modified Sources and Emissions Guidelines for Existing Sources: Oil and Natural Gas Sector Climate Review”, EPA Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances, Nov. 2023,
https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-12/epa_scghg_2023_report_final.pdf
- Zhang et al. (2024) Less than 4% of dryland areas are projected to desertify despite increased aridity under climate change. *Nature Communications Earth and Environment* 5 June 2024
<https://www.nature.com/articles/s43247-024-01463-y>

Ziska, Lewis H (2022) Rising Carbon Dioxide and Global Nutrition: Evidence and Action Needed.
Plants 1(7), 1000; <https://doi.org/10.3390/plants11071000>

10 A SZÉLSŐSÉGES IDŐJÁRÁS KOCKÁZATKEZELÉSE

Fejet-összefoglaló

A szélsőséges időjárási és éghajlati események okozta veszteségek trendjeit mindenekelőtt a népességnövekedés és a gazdasági növekedés határozza meg. A technológiai fejlődés, mint például a jobb időjárás-előrejelzés és a korai figyelmeztető rendszerek jelentősen csökkentették a szélsőséges időjárási események okozta veszteségeket. A jobb építési előírások, az árvízvédelem és a katasztrófaelhárítási mechanizmusok csökkentették a GDP-hez viszonyított gazdasági veszteségeket. Az Egyesült Államok gazdaságának bővülése enyhítette a katasztrófa költségek relatív hatását, amint azt a történelmi és a modern GDP-százalékok összehasonlítása is mutatja. A hőséggel kapcsolatos elhalálozási kockázat az alkalmazkodási (adaptációs) intézkedéseknek (így a légkondicionálás bevezetésének) a következményeként jelentősen csökkent. Mindezek a megfizethető energia elérhetőségétől függenek. Az Egyesült Államokban az elhalálozási kockázat várhatóan még szélsőséges felmelegedési forgatókönyvek esetén sem emelkedik, amennyiben az emberek képesek a változásokhoz alkalmazkodni.

10.1 A társadalmi-gazdasági háttér

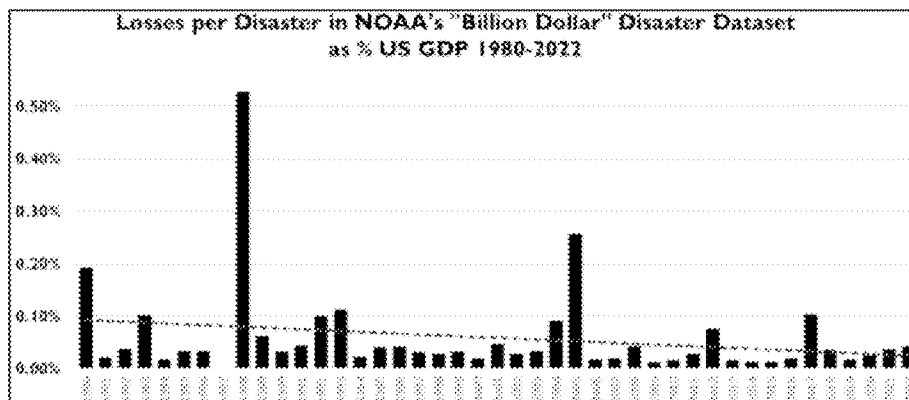
Az ember okozta éghajlatváltozás kockázatbefolyásoló tényezője a természetes időjárás és az éghajlat változékonysága. E tényezőt a part menti és az egyéb katasztrófáknak kiszolgáltatott régiók gazdagságának kitettsége, valamint a szegényebb lakosság sebezhetősége határozza meg. Az Egyesült Államokban az éghajlati kockázat alakulását társadalmi tényezők, nem pedig a tényleges időjárási és éghajlati veszélyek változásai határozták meg. Az időjárási katasztrófák okozta halálesetek száma 1900 óta jelentősen csökkent, annak ellenére, hogy az Egyesült Államok lakossága 1900-ban 76 millióról 2020-ra több mint 331 millióra nőtt (Goklany 2011). Például a galvestoni hurrikán 1900-ban több mint 8000 ember halálát okozta (az Egyesült Államok lakosságának 0,01 százaléka), míg a legsúlyosabb közelmúltbeli katasztrófa, a 2005-ös Katrina hurrikán csak 1800 ember halálát (vagyis az Egyesült Államok lakosságának 0,0006 százaléka) (NOAA Nemzeti Hurrikánközpont 2025; Egyesült Államok Népszámlálási Hivatala 2025).

A technológiai fejlődés jelentősen csökkentette a szélsőséges időjárási események okozta veszteségeket. A korai figyelmeztető rendszerek, a műholdas megfigyelés és a jobb időjárás-előrejelzés csökkentette a halálesetek számát, bár a pontos számokat nehéz számszerűsíteni (Deryugina és Hsiang 2023). Az amerikai időjárás-előrejelzési becslések szerint éves szinten 31,5 milliárd dolláros haszonnal csökkentik az időjárási események okozta veszteségeket, védve emberéleteket, vagyontárgyakat, valamint támogatva a mezőgazdaságot és a közlekedést (NRC 2010). A jobb hurrikán-előrejelzés csökkentette a partraszállás előtti és utáni kiadásokat, a hurrikánonkénti éves költségcsökkenés becslések szerint 5 milliárd dollár (Molina és Rudik 2024).

Az infrastrukturális fejlesztés jelentősen hozzájárult a szélsőséges időjárási események okozta veszteségek csökkentéséhez. Az építési szabályzatok, mint például a Floridában az Andrew hurrikán (1992) után bevezetett előírás, azáltal csökkentették a veszteségeket, hogy biztosították, hogy az épületek ellenálljanak a nagy szélnek és az áradásoknak. A 2002 után épült házak a Michael hurrikán (2018) alatt minimális károkat szenvedtek, ellentétben a régebbi házakkal (FEMA 2020). A tengerparti falak, mint például a Galveston tengerparti fala, védelmet nyújtanak a hullámverés és a viharhullámok ellen. A New Orleans-i hurrikán- és viharkár-kockázatsökkentő rendszer sikeresen mérsékelte a viharhullámot az Isaac hurrikán (2012) alatt (Battelle Memorial Institute 2013). Az Egyesült Államok szárazföldi gátai azáltal segítenek az áradások szabályozásában, hogy tárolják a heves esőzések során felgyülemlett felesleges vizet. A becslések szerint a Tennessee Valley Authority (TVA) gátjai a TVA régióban, valamint az Ohio és Mississippi folyók mentén körülbelül 309 millió dollár éves árvíz kárt akadályoznak meg (TVA, 2025). A Helene hurrikán (2024) során a TVA stratégiai körülbelül 406 millió dollárnyi potenciális kárt akadályoztak meg (APPA 2024).

10.2 Az adatok által jelentett kihívások

A NOAA 1980 óta közöl adatokat az Egyesült Államokban évente előforduló időjárással kapcsolatos katasztrófákról. A becslések szerint a kár meghaladta az 1 milliárd dollárt (inflációval korrigálva), és 2008-tól kezdődően jelentős növekedést mutat. A NOAA és más kormányzati tisztviselők a milliárd dollárnyi katasztrófa-sorozat (Billion Dollar Disaster) emelkedő tendenciáját említették bizonyítékként arra, hogy az éghajlatváltozás súlyosbítja a szélsőséges időjárást (Pielke Jr., 2024). Az idő múlásával azonban az Egyesült Államok népessége és vagyona drámaian megnőtt, így amikor szélsőséges időjárási vagy éghajlati esemény következik be, még akkor is nagyobb a kár, ha nincs mögöttes trend a szélsőséges időjárás gyakoriságában vagy intenzitásában. Pielke Jr. (2024) kimutatja, hogy az időjárási katasztrófákra jutó veszteségek GDP-arányosan körülbelül 80 százalékkal csökkentek 1980 óta, amint azt a 10.1. ábra is mutatja. Pielke Jr. (2024) azt is állította, hogy NOAA nem csupán áttekinthetetlen adatforrásokra és a nem bejelentett kiigazításokra támaszkodott, hanem a NOAA a milliárd dolláros katasztrófákra vonatkozó adatait sem normalizálta a lakosság kitettségének és vagyonváltozásainak megfelelően. 2025 májusában a NOAA bejelentette, hogy visszavonta a Billion Dollar Disaster („milliárd dolláros katasztrófa”) telnevezésű publikációs termékét (Pielke Jr., 2025).



10.1. ábra: Katasztrófák okozta veszteségek a bruttó hazai termék százalékában a NOAA ún. Billion Dollar Disaster (milliárd dolláros katasztrófa)-adatbázisában (2023 júliusában letöltött verzió), 1980–2022. Forrás: (Pielke, Jr. 2024)

Összefoglalva, a szélsőséges időjárási és éghajlati események okozta veszteségek trendjeit a népességnövekedés és a gazdasági növekedés uralja. A technológiai fejlesztések, mint például a jobb időjárás-előrejelzés és a korai figyelmeztető rendszerek, jelentősen csökkentették a szélsőséges időjárási események okozta veszteségeket. A jobb építési szabályzatok, az árvízvédelem és a katasztrófaelhárítási mechanizmusok csökkentették a GDP-hez viszonyított gazdasági veszteségeket. Végül az Egyesült Államok gazdaságának bővülése felhívította a katasztrófaköltségek relatív hatását, amint azt a történelmi és a modern GDP-százalékok összehasonlítása is mutatja.

10.3 Halálozás a hőmérsékleti szélsőségek miatt

10.3.1 Hőség- és hidegkockázatok

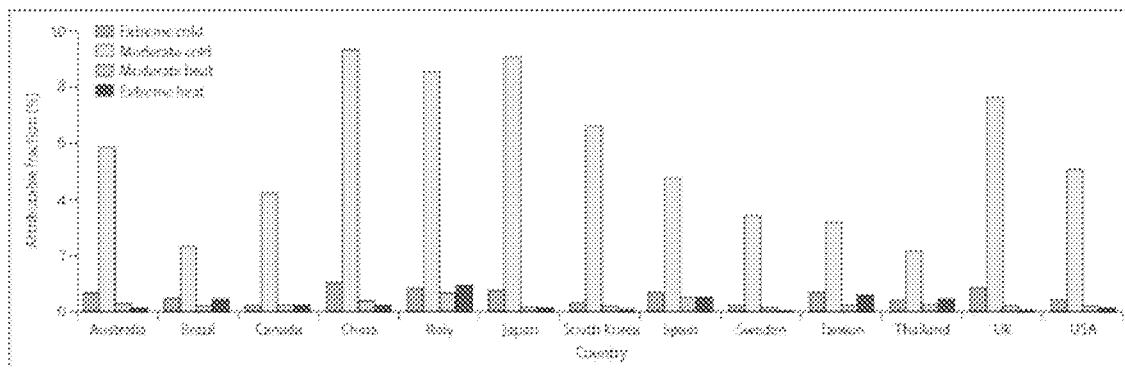
A hőmérsékleti szélsőségek változásai a legbiztosabb hatások közé tartoznak, amelyek várhatóan egy felmelegedő világban várhatóak. Logikus, hogy a szélsőséges hőség eseményei valószínűleg gyakoribbá válnak, míg a szélsőséges hideg események ritkábbá. Ez a mintázat a

történelmi időszakban nyilvánvaló, és a további felmelegedéssel várhatóan folytatódni fog, bár nem az Egyesült Államok kontinentális részén (6. fejezet),

Hőségek idején a halálozást jellemzően hőguta és hőkimerültség okozza, míg hideg szélsőségek idején a halálozás jellemzően a hipotermiából és a szív megterheléséből fakad. A globális halálozási arány hideg körülmények között lényegesen magasabb, mint melegben (Zhao et al. 2021, Ritchie 2024). A hőséggel összefüggő halálozással ellentétben a hideg időjárás kockázatai már mérsékelt hideg körülmények között is fennállnak (Gasparini et al. 2015, Lee és Dessler 2023). Az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége (EPA) (a Betegségellenőrzési és Megelőzési Központok adataira hivatkozva) arról számol be, hogy 1999 és 2015 között átlagosan 2,2 haláleset történt egymillió amerikaira vetítve, amelyek esetén a hideg volt a fő kiváltó ok, és további 2,4 haláleset egymillió amerikaira vetítve, amelyeknél a hideg közrejátszott (EPA 2025). Ezzel szemben 1,3 haláleset volt egymillió amerikaira vetítve, amelyek esetén a hőség volt a fő ok, és további 0,8 haláleset egymillió emberre vetítve, amelyeknél a hőség közrejátszott. Ezzel a mutatóval mérve a hideg körülbelül kétszer annyi időjárással összefüggő halálesetért felelős, mint a hőség.

Azok az epidemiológiai módszerek, amelyek a korrelációs bizonyítékokat – nem csak a halotti anyakönyvi kivonatokat – veszik figyelembe, azt mutatják, hogy a hideg/meleg arány sokkal magasabb lehet. Egy 13 országban végzett, 1985 és 2012 között 74 millió halálesetet felölelő tanulmány becslése szerint a halálesetek átlagosan 7,7 százaléka az optimális tartományon kívüli hőmérsékletnek volt tulajdonítható, ebből 7,4 százalék a hidegnek, és csak 0,4 százalék a melegnek (Gasparini et al. 2015). Más szóval, a hideg időjárás 18,5-szer annyi ember halálát okozta, mint a meleg időjárás.

A 10.2. ábra Gasparini et al. (2015) eredményeinek országokénti eloszlását mutatja. Az Egyesült Államokban a hőmérsékletnek tulajdonítható halálesetek aránya 5,9 százalék, ebből 5,5 százalék a hidegre vezethető vissza, így a hideg időjárás 14-szer annyi ember halálát okozta, mint a meleg időjárás.



10.2. ábra: A szélsőséges és mérsékelt hidegnek és melegnek tulajdonítható halálozások országoként. Forrás: Gasparini et al. (2015) alapján reprodukálva.

Erős bizonyítékok léteznek arra, hogy az emberek alkalmazkodnak az időjárási kockázatokhoz. Lee és Dessler (2023) arról számoltak be, hogy az Egyesült Államok 40 városában a hőmérséklettel összefüggő halálesetek 86 százaléka a hideggel összefüggő halálozásnak volt köszönhető, és hogy az évszakos hőmérséklet emelkedésével az alkalmazkodás miatt a halálozás relatív kockázata mind a meleg, mind a hideg városokban csökkent. Allen és Sheridan (2018) megállapították, hogy a rövid, éveleji hideg események 2-5-ször halálosabbak, mint a meleg események, de mind a hideg, mind a meleg szélsőségek halálozási kockázata közel nullára csökken, ha az események a hideg évszak végén következnek be.

Davis et al. (2003) 28 amerikai városban vizsgálta a hőséggel összefüggő halálozást az 1960-as évektől az 1990-es évek végéig, és azt találták, hogy a mintavételi időszakban a hővel összefüggő elhalálozás háromnegyedével csökkent. Bobb et al. (2014) több mint 100 amerikai város 106 millió lakosának elhalálozási adatait vizsgálta, és azt találta, hogy az 1987 és 2005 közötti időszakban az

átlagos hőség okozta halálozás 60 százalékkal csökkent, 51 ezrelékes halálesetről 19-re. Azt is kimutatták, hogy a legnagyobb csökkenés a 75 év feletti idősök körében következett be. Egy 211 amerikai városban 1962 és 2006 között bekövetkezett 42 millió halálesetet vizsgáló tanulmányban Nordio et al. (2015) a túlzott hőség okozta halálozás kockázatában több mint 90 százalékos csökkenést találtak.

A hőség okozta halálozás jelentős csökkenésével összefüggésben a hőmérséklet emelkedése nettó életmentést jelent, mivel csökkenti a hideg események által okozott halálesetek számát. Az AR6 Munkacsoport 2. fejezetének 16.2.3.5. fejezete (O'Neill et al. 2022) elismeri, hogy a hőség okozta halálozási kockázat idővel csökken:

A hőségnek tulajdonítható elhalálozási arányok a legtöbb országban az idők során csökkentek az egészségügyi rendszerek általános javulása, a lakossági légkondicionálás növekvő elterjedtsége és a viselkedésbeli változások miatt. E tényezők határozzák meg a lakosság hőérzékenységet, túlsúlyba kerülve a hőmérsékletváltozás hatásával szemben.

Az IPCC az AR6 Összefoglaló jelentésében mégis félreértelmezi az általános helyzetet. A dokumentum A.2.5. szakasza kimondja: „A szélsőséges hőség eseményeinek növekedése minden régióban emberi halálozáshoz és megbetegedéshez vezetett (*nagyon magas megbízhatóság*).” De hallgat arról, hogy a szélsőséges hideg események során a halálesetek száma nagyobb mértékben csökkent.

Az Egyesült Államokban megfigyelt hőséggel összefüggő elhalálozásiarány-csökkenést kifejezetten az alkalmazkodásnak tulajdonították. Wang et al. (2018) 209 amerikai városban vizsgálta meg a hőhullámokkal összefüggő elhalálozási arány térbeli változékonyságát 1962 és 2006 között. Míg az egyszerű korreláció a hőhullámok alatti halálozási kockázat növekedését sugallta, a hőhullám intenzitásához való alkalmazkodás figyelembevétele azt eredményezte, hogy a hatás közel nullára esett, és statisztikailag jelentéktelenné vált. Epidemiológiai modelljük eredményeit felhasználva a hőséggel összefüggő halálozási arányt négy RCP felmelegedési forgatókönyv (köztük az RCP8.5) szerint (adaptív viselkedéssel és anélkül) 2050-ig kivetítették. Feltételezték, hogy az emberek továbbra is alkalmazkodnak a hőhullám-kockázathoz azokban a régiókban, ahol élnek. Wang et al. (2018) az Egyesült Államokban nemcsak a hőséggel összefüggő halálozások növekedését vetíti előre, hanem az általános halálozási arány csökkenését is. Arra a következtetésre jutottak, hogy

„Az alkalmazkodás figyelmen kívül hagyása a hőhullámokkal kapcsolatos jövőbeli elhalálozási arány jelentős túlbecsléséhez vezetne... Az alkalmazkodást figyelembe véve a hőséggel összefüggő teljes elhalálozási arány 2050-re idővel nem változna jelentősen a 2006-os szinthez képest.”

10.3.2 Halálozási kockázatok és energiaköltségek

Egy 2016-os, az Egyesült Államokban a hőmérséklet-ingadozásokkal összefüggő hosszú távú elhalálozási kockázatokról szóló tanulmány (Barreca et al. 2016) kimutatta, hogy az Egyesült Államokban az elhalálozási arány növekedése összefügg mind a hideg, mind a meleg időjárással. Idővel azonban az áram bevezetése, valamint a központi fűtés és a légkondicionálás (AC) elterjedése drámaian csökkentette mindkét kockázatot, különösen a meleg időjárással összefüggő kockázatokat. 1960 előtt egy 32°C feletti nap 2,2 százalékkal növelte az átlagos elhalálozási kockázati arányt, de 1960 után ugyanez az időjárás csak 0,3 százalékkal növelte az elhalálozási kockázatot, ami 85 százalékos csökkenést jelent. 1960 előtt a 4°C (39°F) alatti hőmérséklet körülbelül 1 százalékkal növelte az elhalálozási kockázatot, de 1960 után ugyanez az időjárás e számnak csak körülbelül a felét tette ki. A hagyományos háztartási fejlesztéseken keresztüli alkalmazkodás drámaian csökkentette a lakosság kiszolgáltatottságát az időjárási szélsőségekkel szemben. A meleg időjárás miatti elhalálozás

teljes csökkenése a beltéri légkondicionálók széles körű elterjedésének volt betudható, ami a megbízható és megfizethető áram elérhetőségétől függ.

Ennek a megállapításnak a következménye, hogy a fűtési és a hűtési rendszerek használata az energia megfizethetőségétől függ. Doremus et al. (2022) kimutatta, hogy az Egyesült Államokban a gazdag és a szegény háztartások hasonló ütemben igazítják energiakiadásait a mérsékelt hőmérséklet-ingadozásokra, de nem a szélsőséges hőmérséklet-ingadozásokra. Amikor a hőmérséklet nagyon hideg szintre ($< 5^{\circ}\text{C}$) ingadozik, a magas jövedelmű háztartások energiakiadásai 1,2 százalékkal, az alacsony jövedelmű háztartásokéi pedig csak 0,5 százalékkal nőnek. Nagyon forró napokon ($>30^{\circ}\text{C}$) a magas jövedelmű háztartások áramkiadásai 0,5 százalékkal nőnek, míg az alacsony jövedelmű háztartásokéiban egyáltalán nem változnak. Ez utóbbi eredmény még azokban az almintákban is megfigyelhető, ahol minden háztartásban van légkondicionáló. Cong et al. (2022) hasonló eredményekről számoltak be egy arizonai háztartásokból álló mintán. Mindez azt mutatja, hogy a fűtési és hűtési rendszerek széles körű elterjedése ellenére az energia megfizethetlensége következtében az alacsony jövedelmű háztartások ki vannak téve az időjárási szélsőségeknek.

Hivatkozások

- Allen, M.J. and S.C. Sheridan (2018) Mortality risks during extreme temperature events (ETEs) using a distributed lag non-linear model. (2018) *International Journal of Biometeorology* 62, 57–67 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1117-4>
- American Public Power Association. (APPA, 2024, March 7). TVA flood mitigation strategies prevented approximately \$406 million in potential damages. Public Power Current. <https://www.publicpower.org/periodical/article/tva-flood-mitigation-strategies-prevented-approximately-406-million-potential-damages>
- Barreca, Alan, Karen Clay, Olivier Deschenes, Michael Greenstone, and Joseph S Shapiro (2016), Adapting to climate change: The remarkable decline in the US temperature mortality relationship over the twentieth century, *Journal of Political Economy*, 2016, 124 (1), 105–159.
- Battelle Memorial Institute. (2013, December). Final independent external peer review report: Hurricane Isaac (2012) assessment (Prepared for U.S. Army Corps of Engineers, New Orleans District). <https://www.mvn.usace.army.mil/Portals/56/docs/PD/PeerReview/TCN13-003HurrIsaacAssessIEPRFinal.pdf>
- Bobb JF, RD Peng, ML Bell and F Dominici (2014) Heat-related mortality and adaptation to heat in the United States. *Environmental Health Perspectives* 122:811–816; <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/ehp.1307392>
- Cong, S., D. Nock, Y.L. Qiu, Y.L. et al. Unveiling hidden energy poverty using the energy equity gap. *Nature Communications* 13, 2456 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30146-5>
- Davis, Robert E., Paul C. Knappenberger, Patrick J. Michaels and Wendy M. Novicoff (2003) “Changing Heat-Related Mortality in the United States” *Environmental Health Perspectives* 111(14) November 2003 pp. 1712—1718 <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/pdf/10.1289/ehp.6336>
- Deryugina, T., & Hsiang, S. M. (2023). Does the environment still matter? Daily temperature and income in the United States (NBER Working Paper No. 31361). National Bureau of Economic Research. <https://www.nber.org/papers/w31361>
- Doremus, JM, I. Jacqz and S. Johnston (2022), “Sweating the energy bill: Extreme weather, poor households, and the energy spending gap.” *Journal of Environmental Economics and Management*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeeem.2022.102609> .
- Environmental Protection Agency (2025) Climate Change Indicators. <https://www.epa.gov/climate-indicators/view-indicators>

- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2020, February 13). The role of Florida's building codes in Hurricane Michael recovery. <https://www.fema.gov/case-study/role-floridas-building-codes-2018-hurricane-michael>
- Gasparini, A., Y. Guo, M. Hashizume et al. (2015) Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. *The Lancet* 386: 369-385 July 25, 2015 [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0)
- Goklany, I. M. (2011). Deaths from extreme weather events, 1900–2010. Reason Foundation. https://a8d50b36.delivery.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2011/09/deaths_from_extreme_weather_1900_2010.pdf
- Lee, Jangho and Andrew Dessler (2023) Future Temperature-Related Deaths in the U.S.: The Impact of Climate Change, Demographics, and Adaptation. *GeoHealth* 7(8) August 2023 <https://doi.org/10.1029/2023GH000799>
- Molina, R and I Rudik (2024) The value of improving hurricane forecasts. National Bureau of Economic Research Working Paper 32548 June 2024. <https://www.nber.org/digest/202409/value-improving-hurricane-forecasts>
- National Hurricane Center. (n.d.). Costliest U.S. tropical cyclones tables updated. NOAA National Hurricane Center. Retrieved May 8, 2025, from <https://www.nhc.noaa.gov/outreach/history/>
- National Research Council. (2010). Adapting to the impacts of climate change. The National Academies Press. <https://nap.nationalacademies.org/read/12888/chapter/2>
- Nordio, Francesco, Antonella Zanobetti, Elena Colicino, Itai Kloog and Joel Schwartz (2015). “Changing patterns of the temperature–mortality association by time and location in the US, and implications for climate change” *Environment International* Volume 81, pp 80-86 <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.04.009>.
- O'Neill, B., et al. (2022). Key risks across sectors and regions. In AR6 Working Group II Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability (pp. 2411–2538). Intergovernmental Panel on Climate Change. www.ipcc.ch
- Pielke Jr., R. (2024). Scientific integrity and U.S. 'billion dollar disasters'. *npj Natural Hazards*, 1, Article 12. <https://www.nature.com/articles/s44304-024-00011-0>
- Pielke Jr., R. (2025, May 8). RIP NOAA's billion dollar disasters. The Honest Broker [Substack]. <https://rogerpielkejr.substack.com/p/rip-noaas-billion-dollar-disasters>
- Ritchie, H. (2024). How many people die from extreme temperatures, and how this could change in the future: Part one. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/part-one-how-many-people-die-from-extreme-temperatures-and-how-could-this-change-in-the-future>
- Tennessee Valley Authority (TVA). (n.d.). Flood management. Retrieved May 8, 2025, from <https://www.tva.com/environment/managing-the-river/flood-management>
- U.S. Census Bureau. (n.d.). Decennial census by decade. Retrieved May 8, 2025, from <https://www.census.gov/programs-surveys/decennial-census/decade.html>
- Wang, Yan, Francesco Nordio, John Nairn, Antonella Zanobetti and Joel D. Schwartz (2018) “Accounting for adaptation and intensity in projecting heat wave-related mortality” *Environmental Research* 161 pp. 464—471. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.049>
- Zhao, Q., et al. (2021). Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: A three-stage modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 5(7). [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(21\)00081-4](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(21)00081-4)

11 A KLÍMAVÁLTOZÁS, A GAZDASÁG, VALAMINT A SZÉN TÁRSADALMI KÖLTSÉGE

Fejezet-összefoglaló

A közgazdászok a gazdasági növekedés szempontjából az éghajlatot már régóta viszonylag jelentéktelen tényezőnek tartják, e nézetet maga az IPCC is megerősíti az AR5-ben. A újfősdratú klímagazdaságtan felismerte, hogy a CO₂ miatti felmelegedésnek ugyan lehetnek negatív gazdasági hatásai, de ezek túl kicsik az agresszív csökkentési szakpolitika indoklásához, és hogy a globális felmelegedés „megállítása” vagy korlátozására tett kísérlet még a párizsi célkitűzést jóval meghaladó szint esetén is nagyobb kárt okozna, mintha nem tennénk semmit sem. Egy 2012-es nagy visszhangot kiváltó tanulmány megállapítása szerint a globális felmelegedés káros hatással lenne a szegény országok növekedésére, de e megállapítás később nem bizonyult megalapozottnak. A modellezési bizonytalanságokat teljes mértékben figyelembe vevő tanulmányok vagy nem találnak bizonyítékot a CO₂-kibocsátás globális növekedésre gyakorolt negatív hatására vonatkozólag, vagy arra a következtetésre jutnak, hogy a szegény országokra ugyanúgy a javukra szolgál, mint a gazdagoknak.

A szén-dioxid (a „karbon”) társadalmi költségére (SCC) vonatkozó becslés a jövőbeli gazdasági növekedés, a társadalmi-gazdasági folyamatok, a kamatlábak, az éghajlati károk és a rendszerreakciók ismeretlen tényezői miatt rendkívül bizonytalan. Az SCC nem mond semmiféle érdemi információt a klímaváltozás gazdasági vagy társadalmi hatásairól. Egy olyan indexet szolgáltat, amely az éghajlattal és a gazdasággal kapcsolatos feltételezések nagy hálózatait dollárértékekkel köti össze. Egyes feltételezésekből magas SCC-re következtetnek, míg másokból alacsony vagy negatív SCC adódik (azaz a kibocsátás társadalmilag hasznos). A kiindulási feltételezések melletti vagy elleni bizonyítékokat függetlenül kell megállapítani; az így kapott SCC semmiféle további információt nem ad e feltételezések érvényességéről. Billenőpontok lehetőségének figyelembevétele nem indokolja az SCC-becslések jelentős módosítását.

11.1 Klímaváltozás és gazdasági növekedés

11.1.1 Áttekintés

Régi megfigyelés, hogy a gazdaságok általában rosszul teljesítenek a nagyon hideg és a nagyon meleg régiókban, az optimum valahol a kettő között van (Nordhaus, 2006). Ez azt jelenti, hogy a felmelegedés káros lesz a forró régiókban, de előnyös a hidegekben. A hőmérséklet-érzékeny gazdasági tevékenység, amikor csak lehetséges, a legmegfelelőbb helyre vándorol, ahol a társadalom alkalmazkodik a helyi éghajlathoz. Részben ezekre a megfigyelésekre alapozva, 1992-ben Thomas Schelling, az Amerikai Gazdasági Társaság akkori elnöke azzal érvelt, hogy az éghajlatváltozásnak az Egyesült Államok gazdasági tevékenységére gyakorolt hatásai csekélyek lennének a sok más változáshoz képest, amelyek bekövetkeznének (Schelling 1992).

... A gyártás ritkán függ az éghajlattól, és ahol korábban a hőmérséklet és a páratartalom befolyásolta a helyzetet, a légkondicionálás közbelépett. Amikor a Toyota Ohio, Alabama és Dél-Kalifornia közül választja ki egy autószerelő üzem helyszínét, a földrajzi szempontok fontosak, de nem az éghajlat miatt... A pénzügyeket kevésbé befolyásolja az éghajlat; hasonlóan az egészségügyhöz, az oktatáshoz vagy a műsorszóráshoz. A közlekedést befolyásolhatja, de az elmúlt 30 évben a minden időjárási körülmény között elérhető leszállás és felszállás terén elért fejlesztések nagyobbak, mint az éghajlat által okozott bármilyen különbség. Ha az átlagos hatás felmelegedés, a jeges vízi utak és a hőeltakarítás jelentősége csökkenhet.

Az építőiparra hatással van, főként a hideg, és ha az átlagos hatás a felmelegedés irányába mutat, abból az építőipar kismértékben profitálhat.

A változás valójában a mezőgazdaságot érinti. De még ha a mezőgazdasági termelékenység a következő fél évszázadban egyharmaddal is csökkenne, az egy főre jutó GNP-t, amelyet 2050-re elérhettünk volna, csak 2051-ben érnénk el. ...

Arra a következtetésre jutottam, hogy az Egyesült Államokban, és valószínűleg Japánban, Nyugat-Európában és más fejlett országokban a gazdasági teljesítményre gyakorolt hatás elhanyagolható lesz, és valószínűleg észre sem fogjuk venni.

Harminc évvel később maga az IPCC is gyakorlatilag ugyanezt a megállapítást tette az ötödik értékelő jelentésében (Arent et al. 2014, kiemelés tőlem).

A legtöbb gazdasági ágazatban az éghajlatváltozás hatása csekély lesz más tényezők hatásaihoz képest. A népesség, az életkor, a jövedelem, a technológia, a relatív árak, az életmód, a szabályozás, a kormányzás és a társadalmi-gazdasági fejlődés számos egyéb oldalának változása a gazdasági áruk és szolgáltatások kínálatára és keresletére olyan mértékben fog hatással lenni, amely nagyban meghaladja az éghajlatváltozás hatását.

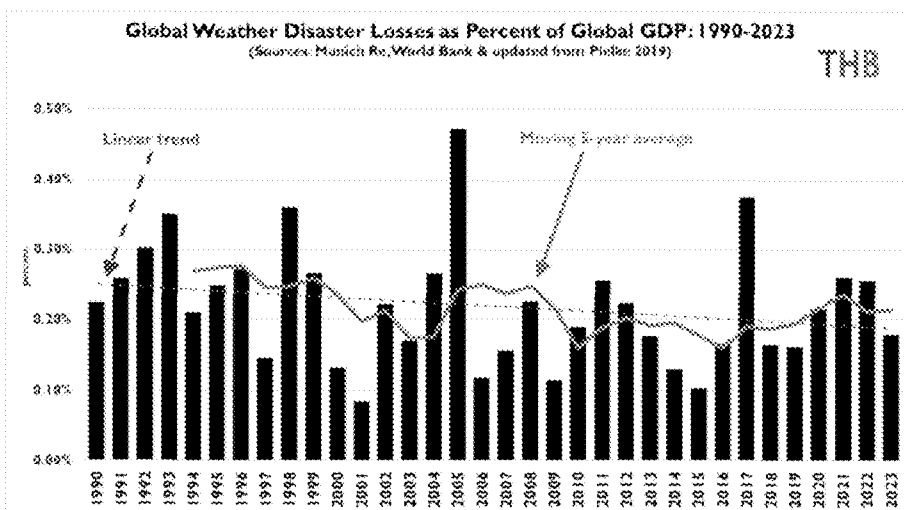
Az AR5 óta felhalmozott bizonyítékok nem változtatnak ezen az értékelésen. Mohaddes et al. (2023) megállapították, hogy a meleg időjárási sokkok kismértékben negatív hatással vannak az Egyesült Államok államszintű termelésére, de nem a jövedelemre, míg a hideg időjárási sokkok mindkettőre negatív hatással vannak, és a hatások körülbelül négyszer nagyobbak, ami azt jelenti, hogy a melegebb körülményekre való áttérés összességében nettó gazdasági hasznot hozna az Egyesült Államok számára.

Ezeket az állításokat a tapasztalatok is alátámasztják. 1900 óta az átlagos globális felszíni hőmérsékleti anomália 1,3°C-kal emelkedett, ami körülbelül annyi, amennyit az IPCC a következő évszázadban mérsékelt kibocsátási forgatókönyv szerint előre jelez. De ugyanakkor, amikor a Föld melegeedett, és a népesség ötszörösére nőtt, az emberiség soha nem látott mértékben kezdett virágozni. Például a globális átlagos élettartam harminckét évről hetvenkét évre nőtt, az egy főre jutó gazdasági aktivitás hétszeresére nőtt, a szélsőséges időjárási események által okozott elhalálozási arány pedig ötvenszeresére zuhant. Az éghajlatváltozás miatti kárelőrejelzések jellemzően arról szólnak, hogy az emberiség életkörülményei mennyivel javulnak, és nem állítják azt, hogy abszolút értelemben rosszabb lesz (O'Neill 2023).

Bár a szélsőséges időjárási események költségesek, minden modern gazdaságban egyre kevésbé fontosak (Formetta és Feyen, 2019). 1990 óta az időjárással kapcsolatos katasztrófaveszteségek a globális GDP-hez viszonyítva csökkentek (Pielke Jr, 2018, 2020), akárcsak az elhalálozási kockázatok (Formetta és Feyen, 2019). A gazdasági időjárással kapcsolatos biztosítási kifizetések ugyan emelkednek, de ezt teljes mértékben magyarázza a gazdaság méretének és a biztosított eszközállomány értékének növekedése. A szélsőséges időjárási események számának korábbi növekedése nem gyakorolt jelentős (pozitív vagy negatív) hatást a biztosítótársaságok piaci értékére (Hu és McKittrick, 2015). A múltbeli szélsőséges időjárási eseményeknek sem volt jelentős hatásuk az amerikai bankok teljesítményére (Blickle et al., 2021); sőt, a felmelegedésről kimutatták, hogy a pénzügyi és biztosítási szektor számára előnyös (Mohaddes et al., 2023). Az alábbi 11.1. ábra szemléltető jellegű. Ezen okok miatt a közgazdászok régóta vonakodnak támogatni az éghajlatváltozás „megállítására” vagy akár az üvegházgáz-kibocsátás agresszív csökkentésére irányuló kísérleteket, mert a költségek nem érnék meg. Ahogy a klímapolitika közgazdaságtanának egyik kritikus fogalmazott (Storm 2017):

A mainstream klímagazdaságtan komolyan veszi a globális felmelegedést, de zavarba ejtő módon arra a következtetésre jut, hogy az optimális gazdaságpolitika az, ha szinte semmit

sem teszünk ellene... A kontraszt feltűnő. Míg a klímatudomány hangos és világos üzeneteket küld arról, hogy a fosszilis tüzelőanyagok kivonását most kell elkezdni, le kell mondani a szénről és az olajról, és az erőforrásokat megújuló energiaforrásokból működő technológiai rendszerek felé kell irányítani, hogy a felmelegedést a 2°C-os határérték alatt tartsuk (IPCC 2014), a mainstream klímagazdaságtan azt állítja, hogy a túlságosan ambiciózus klímacélok szükségtelenül károsítják a gazdaságot, és az azonnali dekarbonizáció túl drága. A legtöbb klímagazdaságtan-szakértő ezért azt javasolja az emberiségnek, hogy csak várjon és figyeljen.



11.1. ábra: A globális időjárás-veszteségek a GDP arányában. Forrás: Pielke Jr. (2023)

A mainstream közgazdaságtan álláspontját a klímapolitikai kérdésben legjobban az elmúlt három évtized integrált értékelési modelljeinek (IAM) az éghajlatváltozási politikával kapcsolatos eredményei képviselik, amelyekért William Nordhaus, a Yale Egyetem közgazdásza 2018-ban közgazdasági Nobel-emlékdíjat kapott. Az IAM-ek (invazív integrált klímamodellek) az éghajlati károk szimulálásának és az optimális politikai válasz értékelésének céljából gazdasági, éghajlati és társadalmi adatokat egyesít egységes keretrendszerbe (Resources for the Future, 2025). Nordhaus munkája általánosságban a mérsékelt globális klímapolitikát támogatta, az agresszív intézkedéseket nagyrészt a század végére halasztották. Nordhaus az 1990-es évek elején fejlesztette ki az úgynevezett Dinamikus Integrált Klíma- és Gazdaságmodellt (DICE) (Nordhaus, 1993), annak érdekében, hogy hosszú távon tanulmányozhassa a klímaváltozás, a klímapolitika és a globális gazdasági növekedés közötti kölcsönhatást. A DICE feltételezi, hogy a globális kibocsátás-szabályozás költségmentesen koordinálható, és azt a kérdést teszi fel, hogy mi legyen az optimális politikai cél. A DICE modell éghajlati komponense egyszerűsített klimatológiai modellezésen alapul. A DICE modell Nordhaus Nobel-díjjal való elismerése idején érvényes verzióját Nordhaus (2018) írta le; a CO₂-megduplázódás éghajlati érzékenységi paramétere 3,1°C volt, ami összhangban van az IPCC-jelentésekben szereplő legjobb becsléssel (3,0°C).

Az alap (klímapolitika nélküli) forgatókönyv mindössze 0,4 billió (T, trillion) dolláros globális kibocsátáscsökkentési költséggel jár, és 134,2 billió (trillion) dolláros globális klímakárt okoz, ami összesen 134,6 billió dolláros költséget jelent. A DICE klímamodell-komponense 2100-ra 4,1°C-os felmelegedést vetít előre az iparosodás előtti hőmérsékletekhez képest. Megjegyzendő, hogy ez becsült felmelegedés magasabb, mint számos IPCC klímamoddellé.

Az optimális szakpolitikai forgatókönyv alig tér el a szokásos üzletmenet útjától. +3,5°C-os felmelegedést céloz meg, más szóval a fosszilis tüzelőanyagok használatát mérsékeltten csökkentjük, és egyébként csupán együtt élünk szinte a teljes felmelegedéssel. Ez arra utal, hogy a CO₂-kibocsátás

nagy része kevésbé káros, mint azok a politikák, amelyek a mérsékléséhez szükségesek lennének. A felmelegedés megakadályozására tett kísérletek költségei hamar meghaladják az előnyöket. A felmelegedés 2,5°C-ra korlátozásának célkitűzése 177,8 billió dolláros összköltséget ad ki, ami 43,2 billió dollárral rosszabb, mintha semmit sem tennénk. Nordhaus nem értékelte a párizsi megállapodáshoz hasonló 1,5°C-os felmelegedési cél elérését, de az még költségesebb lenne.

A DICE későbbi kiadása a felmelegedésből eredő feltételezett károkat magasabb szinten veszi figyelembe, ami nem meglepő módon agresszívabb politikai ajánlásokhoz vezet, amint azt a szén-dioxid-kibocsátás társadalmi költségéről szóló alábbi szakaszban kifejtjük.

11.1.2 Az éghajlatváltozás és a gazdasági növekedés adataalapú elemzése

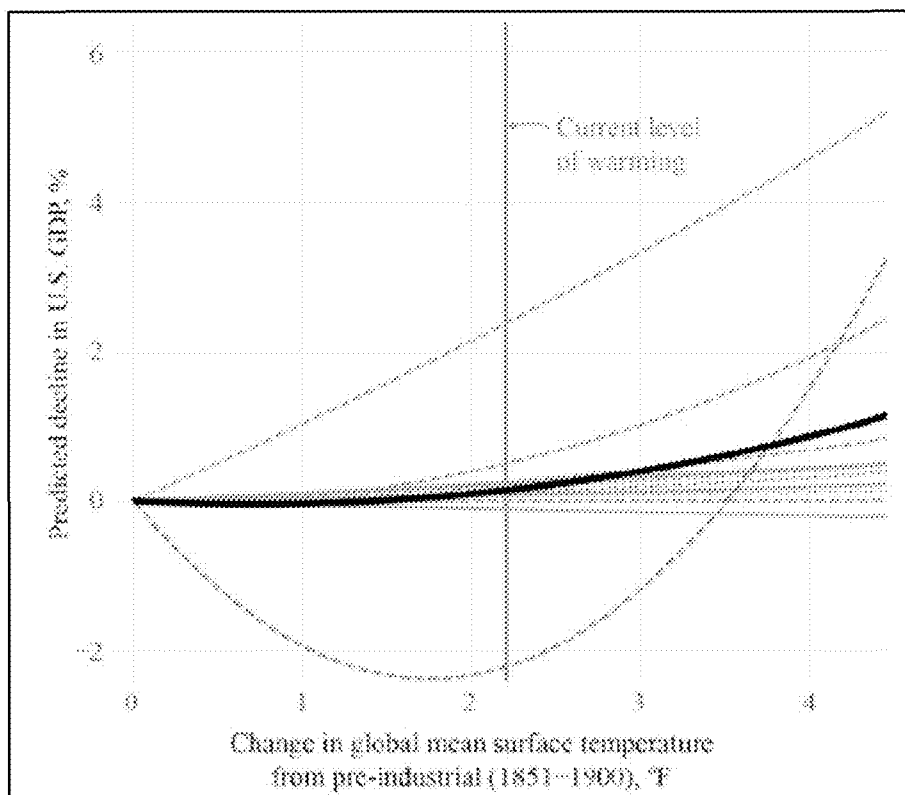
Számos más tanulmány éghajlatváltozás gazdasági növekedésre gyakorolt potenciális hatásának vizsgálatára az IAM-ek helyett atörténeti adatokra alkalmazott ökonometria módszereket használt az. Dell et al. (2012, a továbbiakban DJO12) egy nagyhatású tanulmány volt, ami egy több országra és a 1950 és 2005 közötti időszakra kiterjedő, nemzeti szintű adatokból álló panelt használt, amelyben az éghajlati és gazdasági adatokat a helyi rácscellák szintjétől a nemzeti szintig terjedő hőmérséklet átlagolásával párosították össze népességi súlyok segítségével. Azt találták, hogy a felmelegedés a gazdag országokban jelentéktelen pozitív hatással van a jövedelemnövekedésre, de a szegény országokban jelentős negatív hatással jár. Moore és Diaz (2015) módosították a DICE modellt, hogy figyelembe vegyék ezt a megállapítást, és arra a következtetésre jutottak, hogy a jövedelemkiesés időbeli összetett hatásai miatt a szén-dioxid-kibocsátás társadalmi költsége drámaian magasabb értékét jelenti.

A későbbi nagyszámú szakirodalom vitatta a DJO12 megállapításainak robusztusságát. Burke et al. (2015) egy olyan globális panelt elemzett, amelynek átlaghőmérsékletei országos szintre voltak átlagolva, és azt találták, hogy a felmelegedés negatív hatással van a növekedésre mind a gazdag, mind a szegény országokban, amikor az országos átlaghőmérséklet meghaladja a 13°C-ot. Zhao et al. (2018) Nordhaus (2006) G-Econ adatkészletét használta, ami a gazdasági aktivitást rácscella-szintre bontja le, és a DJO12-típusú eredményeket ugyanazon az országcsoporton ismételték meg, mint amilyeneket a DJO12-ben használtak, de ezután kimutatták, hogy a teljes globális mintán a felmelegedés mind a gazdag, mind a szegény országokban fokozza a növekedést, bár az utóbbi csoportban a pozitív hatás ott jelentkezik, ahol a helyi hőmérséklet körülbelül 16°C alatt marad. Greßer et al. (2021) egy regionális gazdasági adatkészletet fejlesztettek ki a világ 1542 szubnacionális régiójára vonatkozóan a 2005 és 2015 közötti időszakra, és azt találták, hogy a hőmérsékletnek nincs hatása a növekedésre. Yang et al. (2023) frissítette a DJO12 adathalmazt, és a mintavételi gyakoriság vegyességével szemben robusztusan viselkedő becslőt alkalmazott. Megállapították hogy bár a hőmérsékleti sokkok a jövedelmi szintre átmenetileg hatást gyakorolnak, a növekedési ütemre nézve nem volt jelentős és tartós következmény.

Newell et al. (2021) megjegyezte, hogy a szakirodalomban nincs olyan mögöttes elmélet, amely az ökonometria modellspecifikációt irányítaná. Figyelembe véve a magyarázó változók önkényes megválasztását, több mint 800 lehetséges modellspecifikációt azonosítottak. Burke et al. (2015) adatait felhasználva egy olyan becslési módszert alkalmaztak, amely figyelembe veszi a modell bizonytalanságát, és megállapították, hogy a Burke et al. (2015) által preferált modellformát (ami a növekedésre nézve még a gazdag országokban is felmelegedés negatív hatásait sugallta), az optimális modellkiválasztási algoritmus kifejezetten kizárja. Összességében nem tudtak kimutatni a GDP-re vagy a GDP-növekedésre gyakorolt hőmérsékleti hatást. A globális növekedésre gyakorolt hatás 95%-os konfidenciaintervallumát 2011-ra a túlzó RCP8.5 felmelegedési forgatókönyv szerint is -86 százaléktól +388 százalékgig terjedően becsülték. Más szóval, a nettó hatás valószínűleg pozitív, de túl bizonytalan ahhoz, hogy megkülönböztethető legyen a nullától.

Barker (2023) bírálta azon DJO12-feltételezést, hogy az országokat évtizedekkel ezelőtti jövedelmük alapján rögzített „szegény” és „gazdag” kategóriákba lehet csoportosítani. Megjegyezte, hogy sok ország egykor szegény volt, de idővel meggazdagodott, és ha ezt figyelembe vesszük, a Dell et al. által jelentett eredeti hőmérsékleti hatások kicsivé és jelentéktelenné váltak.

Berg et al. (2023) azzal érvelt, hogy az országokat nem szabad nagyvonalúan gazdag/szegény kategóriákba csoportosítani, mert túl heterogének. Ehelyett országspecifikus hőmérsékleti válaszreakciók együtthatókat becsülték meg, majd a hasonló válaszreakciók együtthatókkal rendelkező országokat kis panelekbe csoportosították. Külön becsülték meg a globális és az egyedileg jellemző helyi hőmérsékleti sokkokra adott válaszokat, hogy jobban azonosítsák az éghajlati jelet az időjárási adatokban. Összességében azt találták, hogy a felmelegedés növekedésre gyakorolt negatív hatását tapasztaló országok száma meghaladta a pozitív hatásokat tapasztalókat, de csak átmenetileg: a hatások végül megfordulnak, így körülbelül kétszer annyi ország tapasztal nettó pozitív növekedési hatást. Azt is megállapították, hogy sokkal valószínűbb, hogy a globális hőmérséklet-változások (szemben a helyiekkel) inkább a szegény országok növekedését segítik elő, mint a gazdagokét. Egy 2100-ig tartó szimulációban, még a szélsőséges RCP8.5 forgatókönyvet alkalmazva is, kiszámolták, hogy az átlagos globális GDP-veszteség csak 1,9 százalék lenne a felmelegedés nélküli forgatókönyvhöz képest. Vagyis a gazdaság 400 százalékos növekedése helyett 392 százalékkal növekedne. Nordhaus korábbi elemzésének következménye, hogy a felmelegedés megakadályozására tett kísérletek jóval kevesebb, mint 392 százalékos növekedéshez vezetnének. Összefoglalva, a közgazdászok a klímát viszonylag jelentéktelen tényezőnek tartják a gazdasági növekedésben, ezt a nézetet maga az IPCC is megerősíti az ötödik értékelő jelentésében. A klímagazdaságtan főáramlatai felismerték, hogy a CO₂ által okozott felmelegedésnek lehetnek negatív gazdasági hatásai, de ezek túl kicsik ahhoz, hogy az agresszív csökkentési politikát igazolni lehessen, és a globális felmelegedés „megállítására” vagy korlátozására tett kísérlet még a párizsi célkitűzést jóval meghaladó szinten is rosszabb lenne, mint a semmittevés. Egy nagyhatású 2012-es tanulmány azt sugallta, hogy a globális felmelegedés károsítaná a szegény országok növekedését, de a megállapítás később nem bizonyult megbízhatónak (Tol 2024). Azok a tanulmányok, amelyek teljes mértékben figyelembe veszik a modellezési bizonytalanságokat, vagy nem találnak bizonyítékot a CO₂-kibocsátás globális növekedésre gyakorolt negatív hatására, vagy úgy találják, hogy a szegény országok ugyanolyan valószínűséggel profitálnak belőle, mint a gazdag országok.



11.2. ábra: Az Egyesült Államok GDP-jének csökkenése a felmelegedés foka szerint. Forrás: CEA-OMB (2023)

A Biden-kormányzat csendben tudomásul vette azt a várakozást, hogy a jelentős globális felmelegedés kis hatással lesz az amerikai gazdaságra, még akkor is, amikor az elnök klímavészhelyzetet hirdetett. A 2023-as CEA-OMB jelentésből származó 11.2. ábra az amerikai GDP várható csökkenését mutatja a hőmérséklet-emelkedés függvényében. A színes vonalak egy tucatnyi lektorált publikált tanulmány eredményeit mutatják, míg a folytonos fekete vonal ezek átlagát. Az adatot úgy lehetne összefoglalni, hogy „néhány százalékos hatás néhány fokos felmelegedés esetén”. Tekintettel arra, hogy a gazdaság éves növekedési üteme várhatóan 1-2 százalék lesz, a melegedő földgömb hatása az amerikai GDP-re valóban elhanyagolható.

11.2 Modellek a szén-dioxid társadalmi költségére (SCC)

A szén-dioxid társadalmi költsége (SCC) a szén-dioxid-kibocsátás gazdasági hatásának számszerűsítésére használt eszköz, amely segít a politikai döntéshozóknak mérlegelni a klímapolitikák költségeit és előnyeit. Becslést ad arra a kárra, amit egy tonna CO₂ többlet kibocsátása okoz, dollárban kifejezve. Formálisabban fogalmazva, az SCC a légkörbe jutó további CO₂-mennyiség miatti jelenlegi és jövőbeli gazdasági jóléti marginális veszteség diszkontált jelenértéke.

11.2.1 Az SCC becslése

Bár a szakirodalom az SCC „becsléseire” hivatkozik, azt nem úgy becsülik meg, ahogyan más gazdasági statisztikákat becsülnék. Például a piaci tranzakciókra vonatkozó adatok, beleértve az árakat és a mennyiségeket, felhasználhatók a jelenlegi inflációs ráta vagy az egy főre jutó reál GDP növekedési ütemének becslésére, és ezekhez a mennyiségekhez jól ismert bizonytalanságok tartoznak.

De nincsenek olyan piaci adatok, amelyekkel mérni lehetne a CO₂-kibocsátással feltételezett marginális károk vagy előnyök nagy részét (a legtöbbjét), ezért ezeket gazdasági modellek segítségével kell figyelembe venni.

Például egyes SCC-számítások befolyásoló eleme a szélsőséges időjárás miatti jövőbeni halálozási kockázat változásával járó észlelt társadalmi költség. Nincs olyan piac, ahol az emberek közvetlen árat rendelhetnének ehhez a kockázathoz. A közgazdászok legjobb esetben is megpróbálhatják kikövetkeztetni ezeket az értékeket a kapcsolódó piacokon, például ingatlanpiacon vagy biztosításokon lebonyolított tranzakciók vizsgálatával, de az árváltozásoknak és a légköri CO₂-szintnek tulajdonítható hatások elkülönítése nagyon nehéz.

A közgazdászok az SCC-t IAM-mal (integrált értékelési modellekkel) számítják ki. A két legismertebb a Bizonytalanság, Negatívum és Elosztás Éghajlati Keretrendszere (Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution, „FUND”, Tol 1997) és Nordhaus DICE modellje. Az EPA (2023) újabban továbbiakat vezetett be. Az IAM-ek egy „kárfüggvényt” vagy függvénykészletet ágyaznak be, amely a környezeti hőmérsékletet hozzákapcsolja a helyi gazdasági viszonyokhoz. A kárfüggvénybe ágyazott feltételezések nagymértékben meghatározzák a kapott SCC-t. Az IAM-ek hosszú távú diszkontrátát is feltételeznek, vagy – mint a DICE-ban – a megoldás részeként kiszámítják az optimális belső diszkontrátát.

A kárfüggvény kidolgozásának egyik megközelítése az, hogy a világ országainak egyes ágazataiban a felmelegedés költségének (vagy hasznának) becslésével kezdik, és ezeket összesítik egy globális összegre. Ezt a megközelítést alkalmazták a FUND-ban is. Alternatív megközelítést jelent egy egyszerű egyenlet kidolgozása, ami a globális jövedelmet az átlagos globális hőmérséklet egyszerű kvadratikus függvénye szerint bünteti. Ezt a megközelítést alkalmazták a DICE modellben. A FUND modell esetében több száz paramétert kellett kiválasztani, míg a DICE modellben csak hármat. E hármat választották ki ahhoz, hogy a globális kibocsátáshoz 3°C-os felmelegedéstől kezdődően egy előre meghatározott büntetést (1,2%) rendeljenek, egy kvadratikus taggal, amely azt jelenti, hogy a károk a globális átlaghőmérsékleti anomália négyzetével arányosan nőnek. Barrage és Nordhaus (2024) a közelmúltban megváltoztatták a paramétereket, és a büntetést 3°C-on 1,6%-ra növelték, valamint 3°C-os felmelegedésnél további 1,0 százalékos GDP-büntetést adtak hozzá, hogy figyelembe vegyék a „fordulópontokat” (a felmelegedési küszöb átlépése által kiváltott hirtelen, nagyléptékű környezeti változásokat), valamint egy 0,5 százalékos „ítéleti korrekciót” a 3°C-os felmelegedés esetén kizárt hatásokra. Nem meglepő módon a DICE újabb verziója sokkal magasabb SCC-becslést generál, mint korábban.

A becslés és a bizonytalanság fogalmai nem alkalmazhatók azonnal az egyensúlyi klímaváltozás (SCC) számításaira. Semmilyen mennyiségű adatgyűjtés nem változtathat azon a tényen, hogy az SCC számos összetevője ismeretlen, és az éghajlatváltozás fizikai hatásairól szóló mögöttes szakirodalom ismeretén alapuló megítélésen és véleményen alapul. Az SCC-számításokat ezért legjobb „ha-akkor” állításoknak tekinteni: ha a következő feltételezések teljesülnek, akkor az SCC tonnánként X dollárt jelent. A „ha” állítások listája tartalmazza azt a feltételezést, hogy a világ éghajlata és gazdasága az IAM-ben leírtak szerint működik. Ennek egyik lehetséges oka a felmelegedés időzítése. Minden IAM feltételez az egyensúlyi klímaérzékenységre (ECS) egy olyan értéket, amely a CO₂-kibocsátásból eredő felmelegedés mértékét szabályozza, és szabadon változtatható az ECS-sel kapcsolatos bizonytalanságokkal társított SCC-értékek eloszlásának létrehozása céljából. De ahogy Roe és Baumann (2013) rámutattak, az egyensúlyi idő az ECS négyzetével nő, így az ECS-paraméter felfelé történő módosítása a beállítási folyamat megfelelő lassítása nélkül torz jelenérték-kárbecsléseket okozhat. Különösen a felmelegedés néhány gyakran használt ECS-eloszláshoz kapcsolódó felső tartománya, ami fizikailag még ezer év múlva is lehetetlen (Roe és Baumann 2013), egy IAM-ben mégis néhány évszázadon belül megvalósulna. Az ECS és az egyensúlyi idő összehangolásának elmulasztása az SCC értékének túlbecsléséhez vezet.

11.2.2 Az SCC változásai

Az IAM-számítás minden szintje feltételezéseket tartalmaz, némelyik befolyásosabb, mint mások. A főbb feltételezések a következők:

- A diszkontráta: Az éghajlati károk hosszú időhorizonton halmozódnak fel, és az egy-két évszázaddal későbbi költségeket a jelenre kell diszkontálni. Minél magasabb a diszkontráta, annál kisebb a jövőbeni károk jelenértéke, és fordítva. A diszkontráta a pénz ma történő elköltésének alternatív költségét jelenti ahelyett, hogy befektetnénk, majd holnap többet költenénk. Egyes közgazdászok az SCC-számításokban nagyon alacsony diszkontráták alkalmazása mellett érvelnek, ami olyan politikai ajánlásokhoz vezetett, amelyek a CO₂-kibocsátás csökkentésébe történő viszonylag nagy azonnali beruházásokat részesítik előnyben. A hátránya, hogy más beruházások potenciálisan nagyobb megtérülést hozhatnak a társadalom számára.
- Egyensúlyi klímaérzékenység: Az IAM-ek az IPCC útmutatásait követve szokásosan 3,0°C vagy 3,1°C értéket alkalmaztak. A legfrissebb, adatalapú ECS-értékek általában ennél alacsonyabbak (lásd a 4. fejezetet). Dayaratna et al. (2017, 2020, 2023) kimutatták, hogy az alacsonyabb, empirikusan származtatott ECS-értékek használata drámaian csökkenti a kapott SCC-becslést, még alacsony diszkontráták alkalmazása esetén is.
- Kárfüggvény-együtthatók: Az IAM-ek feltételezik, hogy a CO₂ és a felmelegedés nettó károkozók, és a károk a hőmérséklettel exponenciálisan nőnek. Az újabb IAM-ekbe a feltételezett potenciális éghajlati fordulópontok hatásait is beépítették. A FUND modell korlátozottan, de explicit módon figyelembe vette a CO₂-trágyázás hatásait a mezőgazdaságban. Mivel az együtthatókat a globális zöldülés jelenlegi bizonyítékainak és a megnövekedett CO₂-szintből a növényekre gyakorolt előnyök nagyságának közzététele előtt választották ki (lásd a 2. és 9. fejezetet), a növekedési hatásokat valószínűleg alábecsültek. A DICE modell (és mások) nem tartalmaztak explicit módon semmilyen CO₂-trágyázási előnyt, kivéve, ha azt a kárfüggvény-együtthatók kiválasztásakor a felhasznált szakirodalomban figyelembe vették. A FUND kárfüggvénye tartalmaz egy olyan régiót, amelyben az alacsony felmelegedés számos régióban nettó előnyöket eredményez, e megállapítást alátámasztják a felmelegedés és növekedés ökonometriai modelljei (Berg et al. 2023), valamint a mezőgazdasági változások ökonometriai szimulációi (McKittrick 2025). A DICE kárfüggvény - felépítéséből adódóan - bármilyen felmelegedési szinten kizárja a nettó előnyöket.
- Emissziós forgatókönyvek: Az IAM-ok olyan SCC-becsléseket generálnak, amelyek a meglévő CO₂-koncentráció emelkedésével nőnek. Következésképpen a károk értéke az évszázad későbbi szakaszában magasabb lesz, az elkövetkező évtizedekben feltételezett alapkibocsátásoktól függően.

Néhány integrált modell (mint például a DICE) tartalmazza a CO₂-kibocsátáscsökkentés gazdaságra gyakorolt költségeit, hogy meghatározzon egy optimális növekedési pálya menti SCC-t. Ha a CO₂-kibocsátás csökkentését olcsónak feltételezzük, akkor a modell arra a következtetésre jut, hogy az optimális politikának a nagyobb kibocsátáscsökkentésre kell törekednie, és fordítva.

Informatív megállapítás, hogy az SCC eredményei invariánsak-e bizonyos feltételezések változásaival szemben. De amikor különféle feltételezések magasabb vagy alacsonyabb SCC-értékeket eredményeznek, az SCC-érték változása nem szolgáltat elsődleges bizonyítékot a feltételezések érvényességére. Például 2023-ban az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége körülbelül ötszörösére emelte az általa preferált SCC-értéket a tíz évvel korábban kiadott becslésekhez képest. Ez nem azért van, mert új adatokat gyűjtöttek, vagy jobb matematikai módszereket találtak fel, hanem azért, mert új feltételezéseket alkalmaztak, és ezeknek a feltételezéseknek az érvényessége mindettől független kérdés. Az EPA (2023) 81. oldalán található táblázatok azt mutatják, hogy ha a korábbi elemzésekhez hasonló feltételezéseket alkalmaztak volna, az eredmények nem különböztek volna lényegesen a korábbiaktól. Az egyik új feltételezésük az volt, hogy Moore et al. (2017) elemzése alapján a globális mezőgazdasági károk a korábban véltnél jóval nagyobbak. De ahogy a 9. fejezetben tárgyaltuk, McKittrick (2025) kimutatta, hogy Moore et al. (2017) egy olyan adatbázist használt,

amelyben a CO₂-változási megfigyelések fele hiányzott. Amikor a lehető legtöbb megfigyelést újra figyelembe vették a rendelkezésre forrásokból, és az elemzést megismételték, a várható terméshozam-veszteségek eltűntek, és minden felmelegedési szinten nyereséggé alakultak. Ezért az EPA SCC-felülvizsgálatában a mezőgazdasági terméshozamnak tulajdonított veszteséggel foglalkozó rész alaptalan volt.

11.2.3 Alacsony SCC-re vonatkozó bizonyítékok

A 2. fejezet áttekintette a klímaváltozással és a zöldítéssel kapcsolatos bizonyítékokat, a 9. fejezet pedig az éghajlatváltozást és az amerikai mezőgazdaságot vizsgálta. A bizonyítékok azt mutatják, hogy a CO₂-trágyázás sokkal jótékonyabb hatással van a mezőgazdaságra, mint azt akkoriban tudták, amikor az olyan IAM-eket, mint a DICE és a FUND paraméterezték. Haverd et al. (2020) azt találta, hogy a megfigyelt CO₂-trágyázási arány majdnem kétszerese volt a termésmoделlek által előrejelzettnek. Dayaratna et al. (2023) Lewis (2022) frissített - modern műszeres és paleoklíma-hőmérsékleti adatokat asszimiláló - empirikus ECS-eloszlásbecslését használta, és a FUND modellben 30 százalékos CO₂-trágyázási haszonnövekedést vette figyelembe. Úgy találta, hogy 2050-re a medián SCC még alacsony, 2,5 százalékos diszkontráta mellett is mindössze 18,67 dollár, a valódi érték 24 százalékos valószínűséggel negatív. Öt százalékos diszkontráta mellett a medián SCC-érték a 2040-es évek közepéig negatív, 2050-ben pedig csak 0,37 dollár volt, 49 százalékos valószínűséggel negatív. Így ésszerű feltételezések mellett a frissített tudományos adatokat használó mainstream IAM olyan bizonyítékot szolgáltat, amely alátámasztja azt, hogy az SCC nem szignifikánsan nagyobb nullánál.

Azt is meg kell jegyezni, hogy az SCC a fosszilis tüzelőanyagok felhasználásából származó CO₂-kibocsátás társadalmi költségeire összpontosít. Nem célja a fogyasztók és a társadalom számára a fosszilis tüzelőanyagok elérhetőségéből származó magán-határhasznok mérése. A lakosság hajlandósága arra, hogy bármilyen típusú üzemanyagért fizessen, a megbízható, bőséges fosszilis energia társadalmi értékét jelzi. Tol (2017) becslése szerint a szén-dioxid egyéni haszna a társadalmi költségekhez képest nagy. Szemléltetésül: egy gallon benzin ára az üzemanyag fogyasztója számára jelentkező határértékét jelzi. Tegyük fel, hogy a szén-dioxid társadalmi költségét viszonylag magasnak tekintjük, mondjuk tonnánként 75 dollárnak. Deflálva egy 1,5-ös MCPF⁴ értékkel, ami tonnánként 50 dolláros szén-dioxid-adót eredményezne, benzin esetén megfelelne 44 cent/gallonnak (Lavelle, 2019). A adózás előtti 3,00 dollár/gallon ár azt jelentené, hogy az üzemanyag társadalmi határköltsége közel hétszerese a társadalmi határköltségnek.

11.2.4 Fordulópontok

Az SCC-számítások jellemzően a melegedő éghajlat fokozatos hatásait veszik figyelembe, mint például a lassan olvadó gleccserek és az emelkedő átlaghőmérséklet. A szén-dioxid-kibocsátás társadalmi költségének (SCC) potenciálisan magas értékeiben az egyik mozgatórugó a hirtelen változásokhoz kapcsolódó hirtelen katasztrofális következmények bevezetése a modellekbe (Dietz et al., 2021). Ezeket gyakran nevezik „fordulópontoknak” vagy billenőpontoknak.

A „fordulópont” kifejezés két eltérő fizikai fogalmat ötvöz, amelyek különféle kutatási kihívásokat jelentenek. Sok fizikai rendszer eredendően stabil, hacsak nem hat rá elegendően nagy külső energia. Például egy jégsapka széles hőmérsékleti tartományban érintetlen maradhat, de amint a hőmérséklet átlépi a 0°C-os küszöböt, elolvad. Az ilyen hirtelen átmenetek mindenütt jelen vannak a természetben, és külső erőt igényelnek. Az, hogy az erőnek a rendszer méretéhez képest nagynek kell-e lennie, a rendszer mögöttes stabilitásától függ.

⁴A közpénzek határköltsége: az optimális szén-dioxid-adóhányad az SCC osztva az MCPF-vel (Sandmo 1977).

Egy másik típusú fordulópontnak a neve bifurkáció, ami a nemlineáris rendszerek belső dinamikájának tanulmányozásából származik (Crawford, 1991). Számos rendszerről megfigyelték, hogy egynél több egyensúlyi ponttal rendelkezik, amelyek között minimális külső befolyással vagy akár anélkül is átmozdulhat. Például egy időjárás rendszernek két különböző egyensúlyi állapota lehet: az egyikben szélesend van, a másikban pedig tornádó. Az egyikből a másikba való átmenet külső erőhatás nélkül vagy apró változással is megtörténhet, például a közmondásos pillangó szárnycsapásával (Shen et al. 2014). A „fordulópont” kifejezést néha az ilyen típusú bifurkációra használják, ami magában a rendszerben rejlő, külső erőktől nem feltétlenül függő instabilitást sugall. Ehelyett a rendszer paramétereitől függ, amelyek olyan értékeket vesznek fel, amelyek alátámasztják a bifurkációk kialakulását (Crawford, 1991).

A két eltérő koncepció különböző kutatási kérdéseket vet fel. Az elsővel kapcsolatban arra vagyunk kíváncsiak, hogy az éghajlati rendszer összetevői kellően nagy antropogén kényszer hatására érzékenyek-e hirtelen változásokra. A másodikkal kapcsolatban arra vagyunk kíváncsiak, hogy a Föld éghajlati rendszerének vannak-e olyan eredendő bifurkációi, amelyek külső kényszer hatására vagy anélkül hirtelen átmeneti lehetőséget jelenthetnek.

Olyan modelleket fejlesztettek ki, amelyek arra utalnak, hogy a második típus is lehetséges. Kypke et al. (2020) egyszerű éghajlati modelljében az üvegházgáz-koncentráció egyike azon paramétereknek, amelyek az arktiszi éghajlat olyan bifurkációinak kialakulását szabályozza, amelyben hideg és meleg egyensúly is lehetséges. Ha kellően magas üvegházgáz-kényszert és kellően magas óceáni hőszállítási sebességet hoznak létre, akkor lehetővé válik a bifurkáció. Általánosabb megfigyelés szerint a globális klímaváltozási rendszerek bifurkációkat és többszörös egyensúlyokat tartalmaznak (Brunetti és Ragon, 2023).

A bifurkációk esetleges létezése a Föld éghajlati rendszerében azt jelenti, hogy hirtelen átmenetek lehetségesek, nemcsak nagy kényszerítésekre, hanem kis perturbációkra is. Ez a fordulópontokat az olyan alacsony valószínűségű és potenciálisan katasztrofális események kategóriájába sorolja, mint például egy nagy meteorbecsapódás. Kulcsfontosságú kérdés, hogy vajon az ilyen típusú fordulópontok előre jelezhetők-e. A jelenlegi kutatások nem oldották meg ezt a kérdést (Dakos et al., 2024), és valószínűleg nem is lesznek képesek rá, mivel a „pillangóhatás” egyik következménye, hogy a nemlineáris rendszerekben kiszámíthatósági határok léteznek (Palmer et al., 2014). Ezért nem nyilvánvaló, hogyan lehet ezeket a lehetőségeket beépíteni az SCC-számításokba. A feltételezések kis eltérései a kapott SCC-ben önkényesen nagy eltérésekhez vezetnek, és nincs alapunk választani közöttük. Ha ilyen fordulópontok lehetségesek, a gazdaságpolitika legmegfelelőbb álláspontja a külső katasztrófákkal szembeni ellenálló képesség maximalizálása, mivel nem valószínű, hogy meg tudnánk jósolni vagy meg tudnánk akadályozni a bekövetkezést. Az AR6 (WGI, 1. fejezet) főként az első típusú fordulópontokra összpontosít, nevezetesen a külső kényszerre adott hirtelen változásra. Ez a jelentés jár együtt a „fordulópont” fogalmának népszerű használatával is az éghajlatváltozással kapcsolatos vitákban (lásd például itt: <https://report-2023.global-tipping-points.org/what-is-a-tipping-point/>). Ahogyan az AR6 összefoglalja, a paleoklíma-adatokban vannak hirtelen változásokra utaló jelek, és ezek közül néhányat fordulópontként értelmeztek. Egyes földrendszer-modellekkel végzett előrejelzések olyasféle fordulópontokat adtak ki, mint például az amazonasi erdők pusztulása a CO₂-koncentráció, illetve a hőmérséklet meghatározott értékére etörténő emelkedése esetén.

Éghajlati fordulópontokat övező riadalom tükröződik a Globális Fordulópontokról szóló 2023. december 6-án a COP28 konferencián közzétett jelentésben (Lenton et al., 2023). A jelentés az éghajlati rendszer több mint 25 olyan részét azonosítja, amelyekről azt mondják, hogy fordulópontokat alkotnak. Amit éghajlati „fordulópontnak” minősítenek, az egy mozgó célpont. A szakirodalomban és az értékelő jelentésekben szereplő leggyakoribb példák közé tartozik a grönlandi jégtakaró szétesése, a nyugat-antarktiszi jégtakaró szétesése, az északi-sarki tengeri jég nyári eltűnése, az amazonasi esőerdők elpusztulása, a korallzátonyok pusztulása, az örökfagy és a metánhidrátok felengedése, az atlanti meridionális átfordulási cirkuláció (AMOC) összeomlása, a boreális erdők eltolódása, a nyugat-afrikai monszun eltolódása és az indiai monszun eltolódása.

Minden efféle fordulóponthoz bizonyos fokú rendszerinstabilitás szükséges, hogy felmelegedésre hirtelen átmenetet mutatók legyenek. Emiatt úgy tűnik, nagyon kevés különbséget lehet tenni a fordulópont és a természetes éghajlati változékonyság között. A természetes éghajlati változékonyság a múltban eltolódásokat okozott a nyugat-afrikai és indiai monszunokban, pusztítást az amazonasi erdőkben és a korallzátonyokban, valamint szétesést a grönlandi és a nyugat-antarktiszi jégtakarók egyes részeiben. E hatások a természetes éghajlati változékonyság és az ökoszisztéma-változások évtizedes és évszázados időléptékeiben mind visszafordíthatók.

Súlyosabb következmények lehetőségét hordozza néhány olyan hirtelen lehetséges változás, mint a nyugat-antarktiszi jégtakaró összeomlása és az atlanti meridionális átfordulási cirkuláció (AMOC) összeomlása. Az AR6 WG1 politikai döntéshozóknak szóló összefoglalója szerint:

Az Atlanti Meridionális Átfordulási Cirkuláció (AMOC) a 21. században minden kibocsátási forgatókönyv esetén nagy valószínűséggel gyengülni fog. Míg a 21. századi csökkenést *nagy valószínűséggel* valószínűsítik, a trend nagyságrendjét illetően csak *alacsony* a bizalom. *Közepes a bizalom* abban, hogy 2100 előtt nem lesz hirtelen összeomlás. (C.3.4)

Korlátozott bizonyítékok szerint bekövetkezhetnek kis valószínűségű, nagy hatású kimenetek (amelyeket pl. mély bizonytalansággal jellemzett, egyes esetekben fordulópontokat is érintő jégtakaró-instabilitási folyamatok okoznak), amelyek magas ÜHG-kibocsátású forgatókönyvek (pl. SSP5-8.5) esetén évszázadokra jelentősen növelnék az antarktiszi jégvesztést. (B.5.2)

SCC-számítások esetében az ilyen típusú fordulópont által implicált kutatási kérdés az, hogy vajon megfigyeltek-e már efféle eseményeket a múltban a jelenleg tapasztalható hasonló éghajlati körülmények között, vagy a közeljövőben fognak-e ilyen észlelni. Az AR6 kevés bizonyítékot talál az Atlanti-óceáni Meridionális Átfordulási Cirkuláció (AMOC) vagy a Nyugat-Antarktiszi jégtakaró közelgő összeomlására. Megállapítja viszont, hogy az Északi-sarki tengeri jéghez nem kapcsolódik fordulópont (AR6 Műszaki Összefoglaló, 76. o.)

Dietz et al. egy SCC-modellbe számos potenciális fordulópontot (hirtelen változást) épített be. Úgy találták, hogy körülbelül 25 százalékkal emelték a becslést, főként az örökfagy olvadásával és a metánhidrátok felszabadulásával összefüggésben. Az IPCC azonban ezt a forgatókönyvet nagyon valószínűtlennek tartja (AR6 Technikai Összefoglaló, 107. o.).

Összefoglalva, következhetnek be a természetes éghajlati folyamatokhoz kapcsolódó ismeretlen bifurkációs fordulópontok, de ez a lehetőség nem fordítható le konkrét útmutatásként az SCC-re vonatkozóan. Előfordulhatnak a felmelegedés következményeként a klímarendszerben potenciálisan hirtelen változási pontok, bár az IPCC a legtöbbhez, beleértve a legnagyobbakat is, alacsony valószínűséget rendel. Ha mindezeket figyelembe vesszük, eredményül azt kapjuk, hogy az SCC értéke a 21. században csak szerény mértékben nő.

11.2.5 Vannak-e alternatívák?

Egyre inkább azt állítják, hogy az SCC-ben túlságosan nagy változások vannak ahhoz, hogy az hasznos legyen a politikai döntéshozók számára. A Cambridge Econometrics (Thoung, 2017) kijelentette, hogy a bizonytalanságok miatt „itt az ideje kinyírní”. Az Egyesült Királyság és az EU már nem használja az SCC-t a szakpolitikai értékeléshez, és a „célokkal konzisztens” szén-dioxid-árazást választja (UK Department for Energy Security and Net Zero 2022, Dunne 2017). Az SCC-becslések bizonytalansága azonban nem jelenti azt, hogy az egyéb szabályozási eszközök eredendően jobbák vagy hatékonyabbak lennének. Számos kibocsátási szabályozás (például az elektromos járművekre vonatkozó előírások, a megújuló energiaforrásokra vonatkozó előírások, az energiahatékonysági előírások és bizonyos típusú háztartási gépek tilalma) tonnánként sokkal nagyobb

kibocsátáscsökkentési költséget okoz, mint bármely általános SCC becslés, ami elegendő annak megállapításához, hogy a költség-haszon tesztnek egyikük sem felel meg.

Hivatkozások

- AR6: Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- Arent, D.J., R.S.J. Tol, E. Faust, J.P. Hella, S. Kumar, K.M. Strzepek, F.L. Tóth, and D. Yan (2014) Key economic sectors and services. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 659-708. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap10_FINAL.pdf
- Barker, D. (2023) Temperature Shocks and Economic Growth: Comment on Dell, Jones, and Olken. *Econ Journal Watch* 20(2) 234-253 <https://econjwatch.org/articles/temperature-shocks-and-economic-growth-comment-on-dell-jones-and-olken>
- Barrage, Lint and William Nordhaus (2024) Policies, projections, and the social cost of carbon: Results from the DICE-2023 model. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 121 (13) e2312030121 <https://doi.org/10.1073/pnas.2312030121>
- Berg, Kimberly, Chadwick C Curtis and Nelson Mark. (2021) GDP and temperature: Evidence on cross-country response heterogeneity. NBER Working Paper 31327 June 2023 <http://www.nber.org/papers/w31327>
- Blickle, Kristian; Sarah N. Hamerling, and Donald P. Morgan (2021) : How bad are weather disasters for banks?, Staff Reports, No. 990, Federal Reserve Bank of New York, New York, NY <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/247913/1/sr990.pdf>
- Brunetti, Maura and Charline Ragon (2023) Attractors and bifurcation diagrams in complex climate models. *Physical Review E* 107 054214 <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.107.054214>
- Burke, Marshall, Solomon M Hsiang, and Edward Miguel (2015). Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature*, 527(7577):235–239.
- Council of Economic Advisors-Office of Management and Budget (CEA-OMB 2023) Methodologies and considerations for integrating the physical and transition risks of climate change into macroeconomic forecasting for the president's budget. March 13, 2023. <https://bidenwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2023/03/CEA-OMB-White-Paper.pdf>
- Crawford, John D (1991) Introduction to Bifurcation Theory. *Reviews of Modern Physics* 63(4) October 1991 991–1037.
- Dakos, Vasilis, Chris Boulton, Joshua Buxton et al. (2024) Tipping point detection and early warnings in climate, ecological, and human systems. *Earth System Dynamics* 15 1117–1135 <https://doi.org/10.5194/esd-15-1117-2024>
- Dayaratna, Kevin and Ross McKittrick (2023) "Reply to comment on "climate sensitivity, agricultural productivity and the social cost of carbon in fund" by Philip Meyer" *Environmental Economics and Policy Studies* 2023 link.springer.com/article/10.1007/s10018-023-00364-2
- Dayaratna, Kevin, Ross McKittrick and David Kreutzer (2017) Empirically-Constrained Climate Sensitivity and the Social Cost of Carbon. *Climate Change Economics* April 2017 DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S2010007817500063>
- Dayaratna, Kevin, Ross McKittrick and Patrick J. Michaels (2020) Climate Sensitivity, Agricultural Productivity and the Social Cost of Carbon in FUND. *Environmental Economics and Policy Studies* <https://doi.org/10.1007/s10018-020-00263-w>
- Dell, Melissa, Benjamin F. Jones, and Benjamin A. Olken (2012). Temperature shocks and economic growth: Evidence from the last half century. *American economic journal: Macroeconomics*, 4(3):66–95, 2012. ISSN 1945-7707.

- Dietz, S., J. Rising, T. Stoerk, G. Wagner (2021) Economic impact of tipping points in the climate system. *Proceedings of the National Academy of Science* 2021 Vol. 118 No. 34 e2103081118
- Dunne, Daisy (2017), “Q&A: The Social Cost of Carbon,” *Carbon Brief*, February 14, 2017, <https://www.carbonbrief.org/qa-social-cost-carbon/>
- Formetta, Giuseppe and Luc Feyen (2019) Empirical evidence of declining global vulnerability to climate-related hazards. *Global Environmental Change* 57 101920 <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.05.004>
- Greßer, Christina, Daniel Meierrieks, and David Stadelmann (2021) The link between regional temperature and regional incomes: econometric evidence with sub-national data. *Economic Policy*, 36(107):523–550, 2021.
- Haverd, V., Raupach, M., Briggs, P., et al. (2020). Higher than expected CO₂ fertilization inferred from leaf to global observations. *Global Change Biology*, 26, 2390–2402.
- Hu, Bin and Ross McKittrick (2015) Climatic Variations and the Market Value of Insurance Firms. *Journal of Insurance Issues* Vol. 39, No. 1, pp. 92-111 <https://www.jstor.org/stable/43741103>
- Kypke, K. L., Langford, W. F., and Willms, A. R.: Anthropocene climate bifurcation, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 27, 391–409, <https://doi.org/10.5194/npg-27-391-2020>, 2020.
- Lavelle, Marianne (2019) Carbon Tax Plans: How They Compare and Why Oil Giants Support One of Them. *Inside Climate News* March 7, 2019 <https://insideclimatenews.org/news/07032019/carbon-tax-proposals-compare-baker-shultz-exxon-conocophillips-ccl-congress/>
- Lenton, T.M., D.I. Armstrong McKay, et al. (eds) (2023) *The Global Tipping Points Report 2023*. University of Exeter, Exeter, UK. <https://report-2023.global-tipping-points.org/>
- Lewis, N., (2013) An objective Bayesian, improved approach for applying optimal fingerprint techniques to estimate climate sensitivity. *Journal of Climate*, 26, 7414-7429. <https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI-D-12-00473.1>
- McKittrick, Ross R. (2025) Extended Crop Yield Meta-analysis Data do not Support Upward SCC Revision. *Scientific Reports* 15 article 5575 <https://www.nature.com/articles/s41598-025-90254-2>
- Mohaddes, Kamiar, Ryan Ng., Hashem Psaran, Mehdi Raissi and Jui-Chung Yang (2023) Climate change and economic activity: evidence from US states. *Oxford Open Economics* Vol 2 odac010 <https://doi.org/10.1093/ooec/odac010>
- Moore, Frances C. and Delavane B. Diaz (2015) Temperature impacts on economic growth warrant stringent mitigation policy. *Nature Climate Change*, 5(2):127–131, 2015. ISSN 1758-678X.
- Moore FC, Baldos U, Hertel T, Diaz D (2017) New science of climate change impacts on agriculture implies higher social cost of carbon. *Nature Communications* 8:1607. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01792-x>
- Newell, Richard G., Brian C. Prest, and Steven E. Sexton (2021). The GDP-temperature relationship: Implications for climate change damages. *Journal of Environmental Economics and Management*, 108 <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102445>
- Nordhaus, William (2006). Geography and macroeconomics: New data and new findings. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(10):3510–3517, 2006. ISSN 0027-8424.
- Nordhaus, William. (2018) Projections and Uncertainties About Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies. *American Economic Journal: Economic Policy* August 2018, 10(3): 333-360. <https://pubs.acaweb.org/doi/pdfplus/10.1257/pol.20170046>
- Nordhaus, W. (1993) Optimal Greenhouse-Gas Reductions and Tax Policy in the "DICE" Model *American Economic Review* Vol. 83, No. 2, (Papers and Proceedings) pp.313-317.
- O'Neill, Brian C. (2023) Envisioning a future with climate change. *Nature Climate Change* 13, pages 874–876 <https://www.nature.com/articles/s41558-023-01784-4>
- Palmer, TN, A Döring and G Seregin (2014) The real butterfly effect. *Nonlinearity* 27(9) 10.1088/0951-7715/27/9/R123 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0951-7715/27/9/R123/meta>
- Pielke Jr., Roger (2018): Tracking progress on the economic costs of disasters under the indicators of the sustainable development goals, *Environmental Hazards*, DOI: 10.1080/17477891.2018.1540343

- Pielke Jr., Roger (2020) Economic ‘normalisation’ of disaster losses 1998–2020: a literature review and assessment,” *Environmental Hazards*, 2020, pp. 1-19
- Pielke Jr., Roger (2023) Global disaster losses: 1990-2023 Substack essay
<https://rogerpielkejr.substack.com/p/global-disaster-losses1990-2023>
- Resources for the Future (2025) “Social Cost of Carbon Explorer,” Resources for the Future website, accessed April 22, 2025, <https://www.rff.org/publications/data-tools/scc-explorer/>.
- Roe, Gerard H. and Yoram Bauman (2013) Climate Sensitivity: Should the climate tail wag the policy dog? *Climatic Change* (2013) 117:647–662 DOI 10.1007/s10584-012-0582-6
- Sandmo, Agnar (1975) “Optimal Taxation in the Presence of Externalities.” *Swedish Journal of Economics* 77 (1), 86–98.
- Schelling, Thomas C (1992) Some economics of global warming. *The American Economic Review*, 82 (1):1–14.
- Shen, Bo-Wen, Roger A Pielke Sr and Xubin Zeng (2023) The 50th Anniversary of the Metaphorical Butterfly Effect since Lorenz (1972): Multistability, Multiscale Predictability, and Sensitivity in Numerical Models. *Atmosphere* 2023 14(8) <https://doi.org/10.3390/atmos14081279>
- Storm, S (2017) “How the Invisible Hand is Supposed to Adjust the Natural Thermostat: A Guide for the Perplexed.” *Science and Engineering Ethics* vol 23: 1307—1331.
- Thoung, Chris (2017) “Is It Time to Kill Off the Social Cost of Carbon?” *Cambridge Econometrics Blog*, September 14, 2017, <https://www.camecon.com/blog/time-kill-social-cost-carbon/>.
- Tol, Richard S.J. (1997) On the optimal control of carbon dioxide emissions: an application of FUND Environmental Modeling and Assessment 2: 151—163.
- Tol, Richard S.J. (2017). "The Private Benefit of Carbon and its Social Cost," Working Paper Series 0717, Department of Economics, University of Sussex Business School.
<https://ideas.repec.org/p/sus/susewp/0717.html>
- Tol, Richard S.J. (2024) A meta-analysis of the total economic impact of climate change. *Energy Policy* 185 113922 <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113922>
- UK Department for Energy Security and Net Zero (2022). “Carbon Valuation.” GOV.UK, last updated April 4, 2022. <https://www.gov.uk/government/collections/carbon-valuation--2>.
- US Environmental Protection Agency (2023) Supplementary Material for the Regulatory Impact Analysis for the Final Rulemaking, “Standards of Performance for New, Reconstructed, and Modified Sources and Emissions Guidelines for Existing Sources: Oil and Natural Gas Sector Climate Review”, EPA Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances, November 2023,
https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-12/epa_scghg_2023_report_final.pdf
 accessed February 28, 2024.
- Yang, Yimin, Fei Jia, and Haoran Li. Estimation of panel data models with mixed sampling frequencies (2023). *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 85(3):514–544.
- Zhao, Xiaobing, Mason Gerety, and Nicolai V. Kuminoff (2018) Revisiting the temperature-economic growth relationship using global subnational data. *Journal of environmental management*, 223:537–544, 2018.

12 AZ USA KIBOCSÁTÁSI POLITIKÁINAK GLOBÁLIS ÉGHAJLATI HATÁSAI

Fejezet-összefoglaló

Az USA politikai intézkedéseinek várhatóan észrevehetően kicsiny közvetlen hatása lesz a globális éghajlat alakulására, és minden egyes hatás csak nagyon hosszú idő elteltével jelentkezik.

12.1 A léptékprobléma

A kritikus légszennyező anyagok kibocsátási rátái és légköri koncentrációi szorosan összefüggenek, mivel élettartamuk rövid, koncentrációjuk pedig kicsi; tehát amikor a lokális kibocsátás csökken, a lokális szennyezőanyag-koncentráció gyorsan csökken, általában néhány napon belül. A globális átlagos CO₂-koncentráció azonban egészen másképp viselkedik, mivel a kibocsátások globálisan keverednek, továbbá a globális szén ciklus hatalmas és lassú. A lokális CO₂-kibocsátás bármilyen változása ma csak nagyon kis globális hatással jár, és csak hosszú időkéstellettel.

A CO₂ légkörbe történő kibocsátását követően a többlet CO₂-nek csak körülbelül 40±15 százaléka kötődik meg húsz év alatt. Ez a hányad ezer év után 75±10 százalékra emelkedik, a fennmaradó rész pedig fokozatosan eltávolításra kerül az azt követő több tízezer év folyamán (Ciais et al., 2013, 472-473. o.). Következésképpen az amerikai kibocsátások bármilyen csökkentése csak mérsékelten lassítaná, de nem akadályozná meg a globális CO₂-koncentráció emelkedését. És még ha a globális kibocsátások holnap meg is állnának, évtizedekbe vagy évszázadokba telne, mire a globális CO₂-koncentráció, és így az éghajlatra gyakorolt emberi hatások érdemi csökkenését tapasztalnánk.

A légköri CO₂-készlet csökkentése megkövetelné, hogy a kibocsátás a természetes megkötési ráta alá csökkenjen, feltételezve, hogy a teljes növekedés antropogén. Mivel ez a ráta az elmúlt évtizedekben a kibocsátás átlagosan körülbelül 50 százalékát tette ki, a globális kibocsátás 50 százalékos csökkentése (legalábbis ideiglenesen) megállítaná a légköri CO₂ növekedését. Az 1997-es Kiotói Jegyzőkönyv azt javasolta, hogy az ipari országok CO₂-kibocsátását 2012-re az 1990-es szinthez képest szerény, öt százalékos csökkentési szinten korlátozzák. Bár ezt a politikát a legtöbb ország számára túl nehéz volt megvalósítani, a teljes betartás a légköri CO₂-szintet nem csökkentette volna jelentősen. Csak kismértékben lassította volna a CO₂ növekedését, úgy, hogy a 2100-as évre előre jelzett szintet 2105-re érénk el (Wigley, 1998). Lomborg (2016) becslése szerint a Párizsi Megállapodásban vállalt kezdeti kötelezettségek teljes betartása nem állítaná meg a felmelegedést, csupán körülbelül 0,1 Celsius-fokkal akadályozná meg a felmelegedést, és körülbelül egy évtizeddel késleltetné a 2100-as alaphőmérsékleti szint elérését.

Így a hagyományos légszennyezés-szabályozással ellentétben még a drasztikus helyi intézkedéseknek is elhanyagolható helyi hatásai lesznek, és az is csak hosszú időkéssel. Az a gyakorlat, hogy az egyoldalú amerikai csökkentéseket „éghajlatváltozás elleni küzdelemnek” vagy „éghajlatváltozás elleni fellépésnek” nevezik, és azt feltételezik, hogy képesek vagyunk megállítani az éghajlatváltozást, a probléma mértékének mély félreértését tükrözi.

12.2 Esettanulmány: Az USA-gépjárművek kibocsátása

A léptékprobléma az amerikai gépjárművek példáján keresztül jól illusztrálható. Az EPA 2009-es veszélyeztetettségi megállapítása az Egyesült Államokban a személygépkocsik és a könnyű tehergépkocsik CO₂-kibocsátására összpontosított, mivel a Tiszta Levegő Törvény 202(a) szakasza felhatalmazza az EPA-t, hogy kibocsátási szabványokat határozzon meg a gépjárművek számára, ha a szennyező anyagokról kiderül, hogy veszélyeztetik a közegészséget vagy a jólétet. A 2009-es veszélyeztetettségi megállapítás ezért kötelezte az EPA-t az új gépjárművek kibocsátásának szabályozására, látszólag az amerikai lakosságot érő éghajlatváltozással kapcsolatos károk csökkentése vagy kiküszöbölése érdekében.

Két természetesen felmerülő kérdés: (1) Mekkora CO₂-kibocsátáscsökkenést eredményezne egy ilyen szabályozás? és (2) Milyen lenne egy ilyen szabályozás éghajlati hatása?

Az első kérdésre úgy lehet válaszolni, hogy az amerikai járművek CO₂-kibocsátását összehasonlítjuk a globális összkibocsátással. A második kérdésre az a tény válaszolható, hogy a globális felmelegedés csökkenése az EPA által használt modellek szerint arányos lenne a globális kibocsátások csökkenésével, szem előtt tartva, hogy a légkör CO₂-tartalmának változása egy adott évben a teljes globális CO₂-kibocsátás eredménye, nem csak az amerikai kibocsátásé.

2022-ben az amerikai személygépkocsik és könnyű tehergépkocsik kibocsátása összesen 1,05 milliárd tonna szén-dioxidot tett ki (GtCO₂, EPA 2024). Eközben az energiafelhasználásból származó globális CO₂-kibocsátás összesen 34,6 GtCO₂ volt (Energy Institute 2024). Ezért az amerikai személygépkocsik és könnyű tehergépkocsik a globális energiával kapcsolatos CO₂-kibocsátásnak mindössze 3,0 százalékát teszik ki. Első közelítésben azt mondhatjuk, hogy még az összes amerikai járműalapú kibocsátás megszüntetése is egy-két évvel késleltetné a CO₂ felhalmozódását a légkörben egy évszázad alatt.

Ami az általános felmelegedési trendet is legfeljebb körülbelül 3 százalékkal csökkentené. Az 1979–2023 közötti időszakra, amely a legkiterjedtebb globális lefedettséggel rendelkezik az időjárási adattípusok közül, a felmelegedési trendeket körülbelül ± 15 százalékos pontossággal határozzák meg, így az amerikai járművek CO₂-kibocsátásának megszüntetésével a globális felmelegedés ütemének csökkentésének hatása messze a mérhetőség határai alatt lenne. Tekintettel arra, hogy a globális átlaghőmérséklet a legközvetlenebb klímaváltozási mérőszám, az amerikai járművek CO₂-kibocsátásának csökkentéséből eredő, a másodlagos klímaputatókra (pl. súlyos időjárás, árvizek, aszály stb.) gyakorolt hatások még kevésbé lennének mérhetők.

Következésképpen, a helyi légszennyező anyagokkal (például apró részecskék és ózon) szemben hozott intézkedésekkel ellentétben, az amerikai járművek ÜHG-kibocsátására vonatkozó legagresszívabb szabályozási intézkedésektől sem várhatók el, hogy mérhető mértékben orvosolják az amerikai lakosságra leselkedő állítólagos klímaveszélyeket.

12.3 Zárógondolatok

E jelentés a klímapolitika tájékoztatása céljából árnyalt és bizonyítékokon alapuló megközelítést részesít előnyben, amely megközelítés kimondottan elismeri a bizonytalanságokat. A természetes és emberi hatások hatására bekövetkező éghajlatváltozás kockázatait és előnyeit össze kell mérni az „éghajlati intézkedések” költségeivel, hatékonyságával és járulékos hatásaival, figyelembe véve az ország megbízható és megfizethető energiára való igényét, a lehető legkisebb helyi szennyezés mellett. A globális éghajlati rendszer folyamatos, pontos, megszakítás nélküli megfigyelésén túl nagyon fontos, hogy reális feltételezéseket tegyünk a jövőbeli kibocsátásokkal kapcsolatban, az elfogultságok és bizonytalanságok kezelése érdekében újraértékeljük az éghajlati modelleket, és egyértelműen elismerjük el a szélsőséges események attribúciójával (oktulatásonként) foglalkozó tanulmányok korlátait. A megalapozott és hatékony döntéshozatalhoz elengedhetetlen egy olyan megközelítés, amely a hibás modellekre és szélsőséges forgatókönyvekre való támaszkodás helyett elismeri a CO₂ potenciális kockázatait és előnyeit is.

Hivatkozások

Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, et al. (2013): Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

EPA (2024) Fast Facts: U.S. Transportation Sector Greenhouse Gas Emissions 1990-2022. Available online at <https://nepis.epa.gov/Exec/QueryPDF.cgi?Dockkey=P101AKR0.pdf>

- Energy Institute (2024) Statistical Review of World Energy. Available online at <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- Lomborg, Bjorn (2016) “Impact of Current Climate Proposals” *Global Policy* 7(1) 109—118. Available at <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1758-5899.12295/full>.
- Wigley, T.M.L. (1998). “The Kyoto Protocol: CO₂, CH₄ and climate implications.” *Geophysical Research Letters* 25(13), 2285-2288

SZÓJEGYZÉK

2XCO₂: A légköri szén-dioxid (CO₂) megduplázódása, az éghajlatváltozás kezelésének általánosan használt alapértéke. 2025-ben a légköri CO₂-koncentráció körülbelül 50 százalékkal csökkent a 2XCO₂-hoz képest az 1800-as értékhez képest.

ACE (összegzett ciklonenergia): A trópusi ciklon élettartama alatt felhalmozódott energia statisztikai jellemzője; a maximális tartós szélsőségek-négyzetek összegzéséből számítják ki.

ACRIM (Aktív Üregradiométer Besugárzás Monitor) GAP: A teljes napsugárzási adatsorban az 1989 és 1991 közötti adathiány, amit az előző rendszerrel való átfedés és interkalibráció érdekében szükséges műholdas megfigyelő rendszer elindításának késése okozott.

AEROSZOL: A levegőben lebegő apró szilárd vagy folyékony részecskék sokasága.

AMO: Atlanti Többévtizedes Oszcilláció, a tengerfelszín-hőmérséklet 60 éves ciklusa az Atlanti-óceán északi részén.

ANTROPOGÉN: Emberek általi.

AR (Értékelő Jelentés): Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület által közzétett időszakos értékelés, amelyek az éghajlati rendszerről, a globális változásról és a kapcsolódó kérdésekről szóló jelenlegi ismereteket értékelik. Egy AR ma három munkacsoport jelentésből áll: az első (WG1) a fizikai tudománnyal, a másik kettő pedig a társadalmi hatásokkal és az enyhítési stratégiákkal foglalkozik. A legutóbbi AR az AR6 volt.

ATTRIBÚCIÓ: Oktulajdonítás: ok-okozati összefüggés állítása, mindenekelőtt az antropogén ÜHG-kibocsátás és a megfigyelt éghajlati mintázatok között.

AUTOKORRELÁCIÓ: Az a jelenség, amelyben egy véletlenszerű idősoros változó aktuális értéke korrelál egy korábbi időszakban mért értékkel.

BIOMASSZA: A szerves anyag teljes mennyisége vagy tömege egy adott területen vagy térfogatban.

BRUTTÓ ELSŐDLEGES TERMELÉS: A növények által a fotoszintézis folyamán egy meghatározott időszak alatt felhasznált teljes kémiai energia. A nettó elsődleges termelés a légzéshez szükséges energia felhasználása utáni maradék, és ez jelenti a biomassza növekedéséhez való hozzájárulást.

CMIP (Kapcsolt Modell Összehasonlító Projekt): Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület szervezett erőfeszítése számos különféle globális óceán-légkör éghajlati modell olyan módon való összehasonlítására, hogy a kényszer mindegyikben ugyanazon kibocsátási forgatókönyvv (forgatókönyvek) szerint alakul. A két legutóbbi a CMIP5 és a CMIP6 volt (az AR5, illetve az AR6 esetében).

CSÖKKENTÉS (abatement): A környezetpolitika kontextusában: kibocsátás-csökkentés.

DICE (Dinamikus Integrált Éghajlat- és Gazdaságmodell): A William Nordhaus által 1993-ban kidolgozott integrált értékelési modell.

DISZKONTRÁTA: A jövőbeni költségek és hasznok jelenértékre való átváltoztatására használt kamatláb. Fordított arányban változik a jelenértékkel, így a magas diszkontráta csökkenti a jövőbeni költségek és hasznok jelenértékét.

ECS (Egyensúlyi Klímaérzékenység): A légköri CO₂-koncentráció feltételezett megduplázódására adott válaszként a globális átlagos felszíni felmelegedésben bekövetkező hőmérsékletváltozás mértéke az iparosodás előtti szinthez képest.

ELHALÁLÓZÁS: A halálesetek száma általában egy adott populációra és időszakra vonatkozóan kifejezve.

EL NIÑO: Az El Niño – Déli Oszcilláció meleg fázisa, amelynek idején a hideg víz a dél-amerikai partvidék mentén gyengébben áramlik fel, és gyengébbek a csendes-óceáni passzátszelek.

ENSO: El Niño – Déli Oszcilláció, egy kiemelkedő jelentőségű természetes éghajlati ingadozás, amely Dél-Amerika egyenlítői partján a hideg víz feláramlásának évenkénti változásait, valamint a Csendes-óceánon átívelő passzátszelek erősödését vagy gyengülését jelenti.

ÉGHAJLATVÁLTOZÁS: Az éghajlat emberi hatások miatti változása, szemben az éghajlat változékonyságával, ami természetes eredetű

FACE: (Szabad levegőjű CO₂-dúsulás) Nagyléptékű szabadtéri vizsgálatok, amelyekben a növényeket megemelkedett CO₂-szintnek teszik ki, jövőbeli éghajlati forgatókönyveket szimulálva.

FOSSZILIS TÜZELŐANYAG: Természetes eredetű, a geológiai múltban élő szervezetek maradványaiból képződött széntartalmú tüzelőanyag, például szén, olaj vagy földgáz.

FOTOSZINTÉZIS: Az a folyamat, amelyben a növények növekednek, és amelyhez szén-dioxidra, vízre és fényre van szükség kellően meleg hőmérsékleten (10-35 Celsius fok az optimális működéshez).

FUND (Bizonytalanság, Tárgyalás és Eloszlás Keretrendszere): Richard Tol (1997) integrált értékelési modellje.

GBR (Nagy Korallzátony): A világ legnagyobb korallzátony-ökoszisztémája Ausztrália északkeleti partjainál.

GDP (bruttó hazai termék): Egy ország határain belül, általában egy év alatt előállított összes végtermék és szolgáltatás piaci értéke.

GHCN (Globális Történeti Klimatológiai Hálózat): Időben változó számú, globális eloszlású meteorológiai állomások sokasága, ahol óránkénti, napi vagy havi csapadék-, hőmérséklet-, és esetenként havazás- és hóvastagság-mérést végeznek.

GLOBALIS ZÖLDÜLÉS: Az 1980-as évek eleje óta a legtöbb növényzettel borított szárazföldi területen műholdakkal megfigyelt zöldfelület-növekedés.

GNP (Bruttó Nemzeti Termék): Egy ország polgárai által előállított összes végtermék és szolgáltatás teljes piaci értéke, beleértve az exportot és az importot is, általában egy évre vonatkoztatva.

GNP (Bruttó Nemzeti Termék): Egy ország polgárai által előállított összes belföldön előállított végtermék és szolgáltatás teljes piaci értéke, általában egy évre vonatkoztatva.

HURST JELENSÉG: Lásd: hosszú távú perzisztencia.

HIDROLÓGIA: A víz mozgásának tanulmányozása, különösen a szárazföldön és a légkörben.

IAM (Integrált Értékelési Modell): Egy számítógépes eszköz, amely a közgazdaságtant, a klímatudományt és a társadalomtudományokat ötvözi, hogy kvantitatív kapcsolatokat teremtsen az emberi és a földi rendszerek között, segítve a politikai döntések megalapozását.

IEA (Nemzetközi Energiaügynökség): Egy 1974-ben alapított párizsi székhelyű kormányközi szervezet, amely a globális energiaszektorról nyújt politikai ajánlásokat, elemzéseket és adatokat.

IPAROSODÁS ELŐTTI: Az a rövid történelmi időszak, amikor még az emberi üvegházgáz-kibocsátás nem volt jelentősnek tekinthető. Általában az 1700-as évek közepére teszik.

IPCC (Éghajlatváltozási Kormányközi Testület): Az Egyesült Nemzetek Szervezete és a Meteorológiai Világszervezet által 1988-ban létrehozott nemzetközi szakértőkből és kormányzati képviselőkből álló testület, amelynek célja, hogy a klímapolitika kidolgozásához felhasználható, mindenre kiterjedő tudományos információkkal lássa el a kormányokat.

IR (Infravörös): Hősugárzás, amelyet minden szilárd tárgy és üvegházhatású gáz hőmérsékletének megfelelően bocsát ki.

KIBOCSÁTÁSI FORGATÓKÖNYV: A jövőbeni üvegházgáz-kibocsátás (vagy az ebből eredő légköri koncentráció) feltételezett forgatókönyve, amely a globális gazdasági tevékenységre, a

fosszilis tüzelőanyagok felhasználásának elterjedtségére és (esetenként) a szárazföld és az óceán CO₂-felvételének mértékére vonatkozó feltételezéseken alapul.

KÓNUSZ: Az Egyesült Államok területileg összefüggő 48 államának együttese.

KÖRNYEZETI (ambient): Ami valaminek a közvetlen környezetére vonatkozik.

KUKORICA: Tengeri.

LA NIÑA: Az ENSO hűvös fázisa, amelynek során a hideg víz erősebben áramlik fel a dél-amerikai partoknál, és erősebbek a csendes-óceáni passzátszelek.

LÚGOS: Aminek a kémiai pH-értéke nagyobb, mint 7,0. A savas „ellentéte”, ami 7,0-nél kisebb pH-értéket jelent.

MODELL: Számítógépes kód vagy kódgyűjtemény, amely számszerűsíti a különböző folyamatokról és azok közötti kölcsönhatásokról alkotott ismereteinket.

NCA (Nemzeti Éghajlat-értékelés): Az 1990-es Globális Változáskutatási Törvény által előírt időszakos jelentés, amely összefoglalja az éghajlatváltozás Egyesült Államokra gyakorolt hatását. Öt NCA-jelentés készült: NCA1 (2000), NCA2 (2009), NCA3 (2014), NCA4 (2017-18) és NCA5 (2023).

OECD (Gazdasági Együttműködési és Fejlesztési Szervezet): 38 tagországból álló csoport, amelyek demokratikus kormányzati rendszerrel és szabad gazdasági rendszerrel rendelkeznek.

ÖKONOMETRIA: A közgazdaságtan azon ága, amely a gazdasági rendszerek elemzésével a statisztikai módszerek (főként többszörös regresszió) alkalmazásával foglalkozik.

PALEOKLÍMA: A távoli múlt éghajlata (jellemzően a 1850 előtti időszaké). A modern időjárási eszközök széles körben elterjedése előttről ún. proxy (proxy, „közvetett”) méréseket, például fa-évvégűrűket, jégmagokat virágporokat stb. használnak.

PDI (Teljesítmény Disszipáció Index): A trópusi ciklon időbeli felhalmozódott pusztító potenciáljának statisztikai becslése. A maximális tartós szélsőségek köbének összegzéseként számítják ki.

PDO: Csendes-óceáni Évtizedes Oszcilláció, a Csendes-óceán medencéjének középponti részén ismétlődő óceán-légkör kölcsönhatás, amely túlnyomórészt meleg vagy hideg mintázatokkal jár, és befolyásolja a globális éghajlatot.

PPM: Egymilliomodnyi részecske, egy anyag koncentrációjának mértéke (például) a légkörben.

RCP (Reprezentatív Koncentráció Menet) SZCENÁRIÓK: Különféle forgatókönyvek a jövőbeli üvegházhatású gázok kibocsátására és azok légkörre gyakorolt hatására vonatkozóan. Ezeket az IPCC ötödik értékelő jelentésében (AR5) mutatták be. Az RCP forgatókönyvek számcímkevel (pl. RCP6.0) rendelkeznek, ami azt jelzi, hogy mennyi sugárzási kényszert feltételeznek 2100-ban az iparosodás előtti időkhöz képest, watt/négyzetméterben. Az RCP4.5 és az RCP6.0 köztes forgatókönyvek, míg az RCP8.5 egy szélsőséges forgatókönyv, nagyon nagy jövőbeli üvegházhatású gázkibocsátással.

REGRESSZIÓ: Statisztikai módszer egy lineáris egyenlet együtthatóinak kiválasztására, hogy egy függő változó viselkedését egy vagy több változótól való függés segítségével magyarázzák.

RICARDI ANALÍZIS: A környezetgazdaságtanban használt, David Ricardóról elnevezett módszer az éghajlatváltozás gazdasági hatásainak, különösen a mezőgazdaságra gyakorolt hatás becslésére, azon hipotézis felhasználásával, hogy a jövőbeli mezőgazdasági tevékenységhez való megtérülés várható változásai a jelenlegi földértékekben tőkésülnek.

SAVASODÁS: Általánosan használt kifejezés az óceán pH-értékének lúgosabbról kevésbé lúgos értékekre való csökkenésére.

SCC (a szén társadalmi költsége): Annak a nettó gazdasági kárnak a becslése dollárban, jelenértéken mérve, amit egy tonna CO₂ légkörbe kibocsátási többlete okoz.

SSP (Megosztott Társadalmi-gazdasági Menet) SZCENÁRIÓK: Különféle forgatókönyvek a jövőbeli üvegházgáz-kibocsátásra és azok légkörre gyakorolt hatására. Ezeket az IPCC hatodik értékelő

jelentésében (AR6) mutatták be. Néhány SSP forgatókönyv régebbi RCP forgatókönyveknek felel meg, a folytonosság és a korábbi klímamodell-értékelésekkel való összehasonlítás céljából.

SUGÁRZÁSI VISSZACSATOLÁS: A felszínhőmérséklet megváltozása által okozott egyensúlyváltozás az elnyelt napsugárzás és a kibocsátott infravörös (IR) sugárzás között, a légkör tetején.

SUGÁRZÁSI KÉNYSZER: Az üvegházhatású gázok, antropogén aeroszolok, vulkánkitörések stb. által okozott egyensúlyváltozás az elnyelt napsugárzás és a kibocsátott infravörös (IR) sugárzás között, a légkör tetején.

SZÁRAZJÉG: Fagyott szén-dioxid.

SZÉN („karbon“): A periódusos rendszer 6. eleme. Gyakran használják a szén-dioxid rövidítéseként.

TC: Trópusi ciklon.

TMAX: A napi maximális felszíni levegőhőmérséklet.

TMIN: A napi minimális felszíni levegőhőmérséklet.

TOA: A légkör teteje.

TONNA: tonna, azaz 1000 kg.

TOXIKOLÓGIA: Vegyi anyagok élő szervezetekre gyakorolt káros hatásainak vizsgálata.

TREND: Egy általában lineáris regresszióval becsült együttható, ami az adatok idősorához legjobban illeszkedő egyenes meredekségét jelenti, jelezve a sorozat átlagának időbeni felfelé vagy lefelé történő mozgásában bekövetkező tendenciát.

TSI (Teljes Napbesugárzás): A Föld légkörét elérő, egységnyi területre jutó teljes beeső napsugárzás mennyiségének mértéke, beleértve az elektromágneses sugárzás teljes hullámhossz-tartományára kiterjedően. Általában watt/négyzetméterben (W/m²) adják meg.

ÜVEGHÁZHATÁS (GHE): Az a hajlam, hogy bármely, üvegházhatású gázt tartalmazó bolygó légköre a legalacsonyabb rétegekben melegebb, mintha ezen gázok a légkörben nem lennének jelen.

ÜVEGHÁZHATÁSÚ GÁZ (GHG, ÜHG, ÜVEGHÁZGÁZ): Olyan légköri gáz, amely az infravörös sugárzást elnyeli és kibocsátja, ilyen különösen a vízgőz, a CO₂ és a metán.

VESZÉLYEZTETETTSÉGI MEGÁLLAPÍTÁS (EF): A Környezetvédelmi Ügynökség igazgatójának 2009-es megállapítása, miszerint a jól elkevert üvegházhatású gázok (elsősorban a CO₂) kibocsátása veszélyezteti az emberi egészséget és jólétet.

UHI (Városi Hősziget): Az a jelleg, hogy a lakott területek melegebbek, mint vidéki környezetük, ami a természetes földterületek és növényzet utakkal, parkolókkal, épületekkel és hulladékhő-forrásokkal való felváltása miatt következik be.

USHCN: Az Egyesült Államok Történelmi Klimatológiai Hálózata, amely 1218 felszíni meteorológiai állomás minőségellenőrzött hőmérsékleti és csapadékadatait tartalmazza.

ÁBRÁK ÉS TÁBLÁZATOK METAADATAI

- 2.1. ábra: Képernyőkép Zhu et al. 2016 3. ábrájából <https://www.nature.com/articles/nclimate3004>
- 2.2. ábra: Képernyőkép Gerhart és Ward (2010) munkájából 2. ábra:
<https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1469-8137.2010.03441.x>
- 2.3. ábra: Képernyőkép a Copernicus Marine Services-ből
https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_OMI_HEALTH_carbon_ph_area_averaged/description
- 2.4. ábra: Képernyőkép az AIMS (2023) munkájából 2-4. ábra https://www.aims.gov.au/sites/default/files/2022-08/AIMS_LTMP_Report_on%20GBR_coral_status_2021_2022_040822F3.pdf
- 3.1.1. ábra: Az AR6 WG1 Ch2 képernyőképe, 10. ábra
- 3.1.2. ábra: Az AR6 WG1 Ch7 képernyőképe, 7-6. ábra
- 3.1.3. ábra: A szerző által készített ábra. CO₂ adatforrás: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/index.html>
- 3.2.1. ábra: Képernyőkép Hausfather et al. (2019) S4. ábra <https://doi.org/10.1029/2019GL085378>
- 3.2.2. ábra: A szerző által készített ábra. Adatforrás: Freidlingstein et al. (2024)
<https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2024-519> Adatforrás: <https://globalcarbonbudget.org/download/1442/>
- 3.2.3. ábra: Szerző által létrehozott OLS trendek alapján, Adatforrás:
<https://globalcarbonbudget.org/download/1442/>
- 3.2.4. ábra: Szerző által létrehozott OLS trendek alapján, Adatforrás:
<https://globalcarbonbudget.org/download/1442/>
- 4.1. ábra: Képernyőkép Scafetta (2021) 1. ábra: <https://doi.org/10.3390/cli9110161>
- 5.1. ábra: Adatforrás: <https://climexp.knmi.nl/start.cgi> Szerző által létrehozott ábra. Modellenként egy együttestag, az éves átlaghőmérséklet a globális havi nyers hőmérsékletekből lett kiszámítva; a „tartomány” az egyes évek legmelegebb modellhőmérséklete és a leghidegebb modellhőmérséklet különbsége; A szórás mind a 33 modell nyers hőmérsékletein kiszámítva minden évben.
- 5.2. ábra: Scafetta (2023) képernyőképe 2. ábra <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06493-w>
- 5.3. ábra: A szerző által készített ábra. Adatforrás: <https://climexp.knmi.nl/start.cgi>. Modellenként egy SSP370 együttes tag. Lineáris OLS trendek a globális havi hőmérsékleti anomáliákból számítva 1981-2010-hez viszonyítva.
- 5.4. ábra: A szerző által készített ábra, McKittrick és Christy (2020) 3. ábrája alapján
<https://doi.org/10.1029/2020EA001281>. Frissítve ugyanazokkal a módszerekkel és 2014-től 2024-ig kiterjesztett adatokkal, lásd McKittrick és Christy (2025) a fejezethivatkozásokban.
- 5.5. ábra: Az IPCC AR5 képernyőképe. 10.SM1 ábra, szerzői megjegyzésekkel
- 5.6. ábra: A szerző Christy és McNider (2017) <https://doi.org/10.1007/s13143-017-0070-z> nyomán készítette az ábrát, a frissített adatok a https://www.nsstc.uah.edu/data/cmip6/ERA5_REANALYSES/ és https://www.nsstc.uah.edu/data/cmip6/JRA3Q_REANALYSES/ oldalon érhetők el, itt összeállítva:
https://www.nsstc.uah.edu/data/cmip6/CWG25_Fig_5.7_Table_250627.xlsx
- 5.7. ábra: Képernyőkép a https://climate.rutgers.edu/snowcover/chart_seasonal.php?ui_set=nhland&ui_season=1 oldalról (hozzáférés: 2017. május 27.) 2025)
- 5.8. ábra: Rugenstein és Hakuba (2023) képernyőképe 1. ábra <https://doi.org/10.1029/2022GL101802>

5.9. ábra: A szerző által készített ábra. Adatforrás: <https://climexp.knmi.nl/start.cgi>. OLS lineáris trendek. Modellenként egy SSP370 együttes tag, átlagolt felszíni levegőhőmérsékletek júniustól augusztusig a 31N és 49N szélességi fok, 84W és 102W hosszúsági fok között. A NOAA/NCEI ugyanezen hónapokra vonatkozó megfigyelt hőmérsékleti adatai a <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/statewide/time-series> oldalon a 12 kukoricaövi államra vonatkozóan, átlagolva.

6.1.1. ábra Koutsoyiannis (2013) 10. ábrájának szerzői másolata
<http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.804626>

6.2.1. ábra Maue (2025) ábrájának képernyőképe <https://climatlas.com/tropical/>

6.2.2. ábra A szerző által létrehozott ábra. Adatok a Nemzeti Hurrikánközpontból (2024)
<https://www.nhc.noaa.gov/climo/>

6.2.3. ábra A szerző által létrehozott ábra. Adatok a NOAA Hurrikánközpontból
https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/All_U.S._Hurricanes.html

6.2.1. táblázat A szerző által létrehozott táblázat. NOAA HRD adatok
https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/most_intense.html

6.3.1. ábra: Képernyőkép az NCA4-ből

6.3.2. ábra: A szerző által létrehozott ábra. Adatforrás: https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

6.3.3. ábra: A szerző által létrehozott ábra. Adatforrás: https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

6.3.4. ábra: A szerző által létrehozott ábra. Adatforrás: https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

6.3.5. ábra: A szerző által létrehozott ábra. Adatforrás: https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

6.3.6. ábra: A szerző által létrehozott ábra. Adatforrás: https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

6.3.7. ábra Képernyőkép a <https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves> oldalról

Dobozos táblázatok. Szerző által létrehozott táblázat. McKittrick és Christy adatai (2025)

6.4.1. ábra Szerző által létrehozott ábra. McKittrick és Christy adatai (2025)

6.4.2. ábra Szerző által létrehozott ábra. McKittrick és Christy adatai (2025)

6.4.3. ábra Szerző által létrehozott ábra. McKittrick és Christy adatai (2025)

6.4.4. ábra Szerző által létrehozott ábra. McKittrick és Christy adatai (2025)

6.4.5. ábra Szerző által létrehozott ábra. McKittrick és Christy adatai (2025)

6.5.1. ábra: A szerző által készített ábra. Adatforrás: https://www.spc.noaa.gov/wcm/data/1950-2024_actual_tornadoes.csv

6.7.1. ábra: A szerző által készített ábra. Adatforrás: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/uspa/wet-dry/0>, hozzáférés: 2025. június 16. OLS trendvonal hozzáadva.

6.8.1. ábra: Lizundia-Loiola et al. (2021) képernyőképe. 12. ábra.

6.8.2. ábra: Marlon et al. (2012) képernyőképe. 2. ábra, C panel.
<https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.1112839109>

6.8.3. ábra: A szerző által készített ábra. 1926-tól 2016-ig terjedő adatok:
https://web.archive.org/web/20200212033452/https://www.nifc.gov/fireInfo/fireInfo_stats_totalFires.html. 2017
utáni adatok: <https://www.nifc.gov/fire-information/statistics/wildfires> Hozzáférés: 2025. június 16.

7.1. ábra: Képernyőkép a <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/> oldalról

7.1. táblázat: A szerző által létrehozott táblázat. A 6.2. szakaszból a <https://judithcurry.com/wp-content/uploads/2018/11/special-report-sea-level-rise-3.pdf>

7.2. ábra: Képernyőkép innen: https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=9414290
(letöltve: 2025.04.22.)

7.3. ábra: Képernyőkép innen: https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8771450
(letöltve: 2025.04.22.)

7.4. ábra: Képernyőkép innen: https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8761724
(letöltve: 2025.04.22.)

7.5. ábra: Képernyőkép innen: https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8518750
(letöltve: 2025.04.22.)

7.6. ábra: A szerző által készített ábra. Adatok innen:
https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8518750

8.1. ábra Képernyőkép innen: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT5.0Analysis.pdf>

8.2. ábra Képernyőkép Hansen és Karecha (2025) munkájából 1. ábra
<https://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2025/CloudFeedback.13May2025.pdf>

8.1. táblázat Képernyőkép a 12.12. táblázat 1. oszlopáról, IPCC AR6 Munkacsoport I. jelentése

9.1. ábra Képernyőkép Taylor és Schlenker (2021) munkájából 1. ábra, <https://www.nber.org/papers/w29320>

9.2. ábra Képernyőkép McKittrick (2025) munkájából 1. ábra, <https://www.nature.com/articles/s41598-025-90254-2>

10.1. ábra: Képernyőkép Pielke (2024) munkájából <https://www.nature.com/articles/s44304-024-00011-0> 3.
ábra: 10.2. ábra: Képernyőkép Gasparini et al. munkájából (2015) 2. ábra, [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0)

11.1. ábra: Képernyőkép Pielke Jr.-tól (2023). <https://rogerpielkejr.substack.com/p/global-disaster-losses1990-2023>

11.2. ábra: Képernyőkép CEA-OMB-től (2023) <https://bidenwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2023/03/CEA-OMB-White-Paper.pdf> 1. ábra.

A SZERZŐKRŐL

John Christy PhD a Huntsville-i Alabamai Egyetem Léggör- és Földtudományok Tanszékének kitüntetett professzora, valamint Alabama állam klimatológusa. Matematika szakon szerzett BA diplomát a Fresno-i California State University-n, MSc-t és PhD-t a champaigni Illinois-i Egyetemen. Az Amerikai Meteorológiai Társaság tagja, és a NASA Kivételes Tudományos Teljesítményért járó Érem kitüntetésének birtokosa, ugyanis Dr. Roy Spencerrel együtt poláris pályán keringő műholdakról ők állították elő az első globális léggöri hőmérsékleti adatsort. Ő volt a 3. IPCC Értékelő Jelentés (AR3, 2001) vezető szerzője: Társszerzője volt az amerikai NAS (Nemzeti Tudományos Akadémia) felszínhőmérséklet-rekonstrukciókról szóló szakértői jelentésének (2006), és tagja volt a NOAA Klímaváltozás Tudományos Programjának, a NASA Földtudományi Albizottságának, az amerikai Nemzeti Kutatási Tanács Űrkutatási Testületének és az USA Környezetvédelmi Hatóság (EPA) Tudományos Tanácsadó Testületének. Mindemellett Dr. Christy 20 kongresszusi meghallgatáson tett tanúvallomást.

Judith Curry PhD a Georgia Institute of Technology nyugalmazott professzora, ahol 13 évig a Föld- és Léggörtudományi Tanszék vezetője volt. A Climate Forecast Applications Network (CFAN) elnöke és társalapítója. Geofizikából doktorált a Chicagói Egyetemen. 192 lektorált publikáció szerzője vagy társszerzője a léggör- és éghajlattudományok területén. Két tankönyv, valamint legutóbb a *Climate Uncertainty and Risk* című könyv szerzője. Curry tagja az Amerikai Meteorológiai Társaságnak, az Amerikai Tudományfejlesztési Társaságnak, az Amerikai Geofizikai Uniónak, valamint az Amerikai Tudományos és Irodalmi Akadémiának. Tagja volt a Globális Éghajlatkutatási Program számos tudományos irányító bizottságában, valamint az Energiaügyi Minisztérium Biológiai és Környezeti Kutatási Tanácsadó Bizottságában, a NASA Tanácsadó Testületének Földtudományi Albizottságában, valamint az NRC Űrkutatási Tanácsában és az Éghajlatkutatási Bizottságban. Dr. Curry 13 kongresszusi meghallgatáson tett tanúvallomást.

Honored (Nagytiszteletű) **Steven E. Koonin PhD** a Stanford Hoover Intézetében a „Teller Ede vezető munkatárs” cím birtokosa. Tudományügyi helyettes államtitkár volt az Energiaügyi Minisztériumban (2009-2011), vezető kutató a British Petroleumnél (2004-2009), valamint professzor a Caltech-en (1975-2004, ebből az elmúlt kilenc évben alelnök és igazgató). Koonin tagja a Nemzeti Tudományos Akadémiának és a JASON kormányzati tanácsadó csoportnak. A Lawrence Livermore Nemzeti Laboratórium kormányzója, hasonló tisztségeket töltött be a Los Alamos, a Sandia, a Brookhaven és az Argonne nemzeti laboratóriumokban. Korábban egyetemi professzorként dolgozott a New York-i Egyetemen, nem rezidens vezető munkatársként az American Enterprise Institute-ban, valamint a Védelmi Elemzések Intézetének kuratóriumi tagjaként. Koonin fizika szakon szerzett BSc diplomát a Caltech-en, elméleti fizikából pedig PhD fokozatot a Massachusetts Institute of Technology-n. Ő a 2021-es bestseller, az *Unsettled: What Climate Science Tells Us, What It Doesn't, and Why It Matters*, az 1985-ös *Computational Physics* című tankönyv, valamint a fizika, az asztrofizika, a tudományos számítás, az energiatechnológia és -politika, valamint a klímatudomány területén mintegy 200 lektorált cikk szerzője. (Az *Unsettled*-et *Tisztázatlan: Amit az éghajlattudomány mond, amit nem mond, és mindez miért fontos* címmel 2023-ban magyarul is megjelent.)

Ross McKittrick PhD a kanadai Ontario állambeli Guelph Egyetem környezetgazdaságtan professzora. Közgazdaságtanból BA diplomát a Queen's Egyetemen, MA és PhD fokozatot pedig a British Columbia Egyetemen szerzett. Éghajlatváltozással, szennyezéssel és közpolitikával kapcsolatos témákban széleskörű publikációs tevékenységet fejtett ki mind közgazdaságtudományi, mind fizikai folyóiratokban. Könyvét, a *Economic Analysis of Environmental Policy*-t, a University of Toronto Press adta ki 2010-ben. Az alkalmazott statisztikában szerzett ismeretei arra késztették, hogy lektorált cikkek szerzője, illetve társszerzője legyen a fizikai tudományok széles skáláján, beleértve a

paleoéghajlat rekonstrukcióját, a malária terjedését, a felszínhőmérséklet mérését, az éghajlati attribúció (oktulatájdónítás) módszertanát és az éghajlati modell értékelését. McKittrick professzor világszerte számos meghívásos tudományos előadást tartott. Meghívott közreműködő volt a Nemzeti Tudományos Akadémia 2006-os felszínhőmérséklet-rekonstrukcióról szóló jelentésében, szaklektorként szolgált a három legutóbbi IPCC értékelő jelentésben (I. és II. munkacsoport), és tanúvallomásokot tett az Egyesült Államok Kongresszusa, valamint a kanadai alsóház és szenátus bizottságai előtt.

Roy W. Spencer PhD vezető kutató az Alabamai Egyetemen, Huntsville-ben. Léggör- és Óceántudományi BSc diplomát a Michigani Egyetemen szerzett, MSc és PhD fokozatát meteorológiából a Wisconsin-Madison Egyetemen kapta. Spencer tudományos publikációi az időjárási folyamatok és az éghajlatváltozás Föld körül keringő műholdakról történő megfigyelésére, valamint az éghajlati érzékenység és az éghajlati visszacsatolások diagnosztizálására szolgáló egyszerű fizikai modellek használatára összpontosítottak. A NASA klímakutatásokért felelős vezető kuitatójaként az Aqua műhold ún. Fejlett Mikrohullámú Pásztázó Radiométer (AMSR-E) amerikai tudományos csoport vezetőjeként szolgált. Ez a tengerfelszín-hőmérsékletéről, a tengeri jégről és az éghajlati rendszer számos egyéb jellemzőjéről a lehető legpontosabb globális mérési eredményeket szolgáltatatta. Dr. John Christyvel együtt Spencer fejlesztette ki az első műholdas technikát a globális hőmérséklet-megfigyelésre, amiért megkapták a NASA Kivételes Tudományos Teljesítmény Érmét és az Amerikai Meteorológiai Társaság különdíját.

Fordítás:

Szarka László Csaba, a Professzorok Batthyány Köre energia-munkacsoport elnöke,

Kocsis Ferenc, Király József, ...

2025. augusztus 14.

Lektorálás: folyamatban (Kiss Ádám, Bársony István, ...)

From: Ross McKittrick [ross.mckittrick@gmail.com]
Sent: 7/6/2025 3:39:25 PM
To: Judith Curry [curry.judith@gmail.com]; Roy W. Spencer [roywspencer@hotmail.com]; John Christy [climateman60@gmail.com]; Steven Koonin [steven.koonin@gmail.com]; Travis Fisher [travis.scott.fisher@gmail.com]; Josh Loucks [loucksj14@gmail.com]; Cohen, Seth [seth.cohen@hq.doe.gov]
Subject: Fwd: Texas Flood Tragedy

----- Forwarded message -----

From: Dr. Matthew Wielicki from "Irrational Fear" <irrationalfear@substack.com>
Date: Sun, Jul 6, 2025 at 11:14 AM
Subject: Texas Flood Tragedy
To: <ross.mckittrick@gmail.com>

Forwarded this email? [Subscribe here](#) for more

 The linked image cannot be displayed. The file may have been moved, renamed, or deleted. Verify that the link points to the correct file and location.

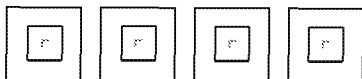
Thank you for subscribing to the "Irrational Fear" substack by Dr. Matthew Wielicki. Your support is greatly appreciated.

Texas Flood Tragedy

A Call for Truth and Action, Not Political Exploitation

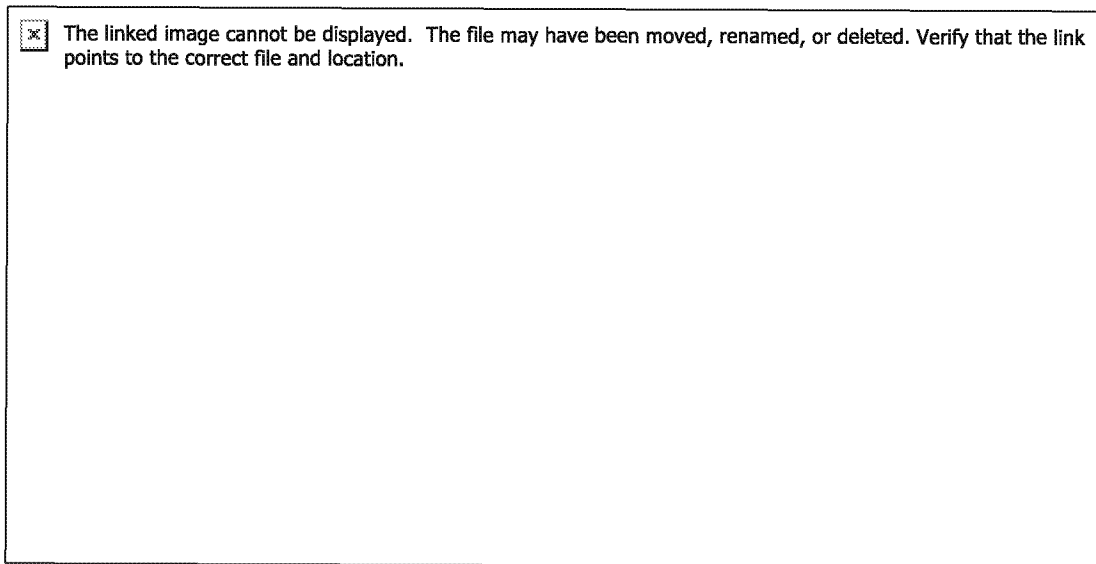
DR. MATTHEW WIELICKI

JUL 6



READ IN APP 

The heartbreaking flooding in central Texas, including the devastating loss of young lives at a girls' camp near Austin, is a tragedy that demands reflection, accountability, and action, not political grandstanding. This catastrophe, while deeply painful, must be examined through a lens of historical and scientific clarity, not hijacked to push climate change or budgetary blame games.



<https://www.cnn.com/weather/live-news/texas-flooding-camp-mystic-07-06-25-hnk>

The Flooding Crisis: What Happened?

The severe flooding that struck central Texas, including areas near Austin, has brought renewed attention to the vulnerabilities of flood-prone valleys. Heavy rains rapidly overwhelmed local waterways, causing flash flooding that destroyed homes, infrastructure, and tragically claimed lives. Reports indicate that despite receiving advanced warning from weather services, the response at local and regional levels was tragically insufficient, highlighting critical gaps in emergency preparedness and land-use planning. I've previously detailed similar failures in emergency preparedness and the consequences in my article, *"Shifting the Blame"*.

Thanks for reading Irrational Fear! This post is public so feel free to share it.

Share

Irrational Fear is a reader-supported publication. To receive new posts and support my work, consider becoming a free or paid subscriber.

 The linked image cannot be displayed. The file may have been moved, renamed, or deleted. Verify that the link points to the correct file and location.

Historical Context of Texas Flooding

Historically, central Texas is recognized as one of the most flood-prone areas in the United States. Flood events have occurred with devastating frequency and intensity for decades. The construction of dams and reservoirs throughout the 20th century was largely driven by the necessity of managing these frequent flooding episodes. Ironically, these infrastructure developments dramatically reduced flood magnitudes across many rivers, making the recent catastrophe even more indicative of infrastructure and regulatory failure than any long-term climatic shift. I expanded on the importance of historical context and its frequent omission from climate narratives in my earlier article, "Unnatural Disasters," dealing with the Palisades Fire, which was also blamed on climate change.

According to extensive research, including the recent Texas A&M 2024 Climate Report, river flooding in central Texas has not demonstrated a significant long-term increasing trend. The report explicitly states,

"No long-term river flooding trend has been identified in the observations, nor is such a trend projected at this point..."

Evaluating the Official Government Reports

Detailed examination of reports from the [EPA](#) and [NOAA](#) provides a critical counterpoint to simplistic climate narratives often pushed by the media and politicians. EPA documentation confirms that while the frequency of intense rainfall events has slightly risen, overall water availability and river flow in Texas have actually declined due to increased evaporation rates, changing vegetation, and altered land-use practices.

Additionally, NOAA and Texas A&M climate data explicitly contradict claims that extreme rainfall frequency and flooding are unprecedented or primarily climate-driven. Central Texas has experienced variable rainfall trends, with recent decades showing primarily decreasing precipitation, dependent largely upon specific locations within the state. EPA data plots show variability rather than clear upward trends in flooding events, undermining the narrative that climate change alone drives increased flooding... unless climate change is only working in certain parts of the country.

 The linked image cannot be displayed. The file may have been moved, renamed, or deleted. Verify that the link points to the correct file and location.

This figure shows changes in the size of flooding events in rivers and streams in the United States between 1965 and 2015. Blue upward-pointing symbols show locations where floods have become larger; brown downward-pointing symbols show locations where floods have become smaller. The larger, solid-color symbols represent stations where the change was statistically significant. Source: <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-river-flooding>

Dissecting the Climate Narrative and Political Exploitation

Despite clear data from authoritative sources, politicians and certain climate scientists quickly leveraged the tragedy to blame recent federal budget cuts to agencies like NOAA and the National Weather Service. They suggested these budgetary adjustments significantly impaired weather forecasting, amplifying fatalities from severe weather events.

One particularly egregious example is a recent statement by Jay Inslee, who attempted to link President Trump's policy actions on renewable energy directly to the Texas floods, claiming cuts to solar and wind energy have exacerbated extreme weather.

 The linked image cannot be displayed. The file may have been moved, renamed, or deleted. Verify that the link points to the correct file and location.

This claim is not only scientifically baseless but profoundly insensitive, using tragedy to push a political agenda.

However, historical records of flood-related fatalities...

 The linked image cannot be displayed. The file may have been moved, renamed, or deleted. Verify that the link points to the correct file and location.

clearly shows no definitive upward trend correlating with agency budgets, GHG concentration, or global average temperature. Death tolls from flooding fluctuate year-to-year without demonstrable dependence on changes in agency staffing or funding. These data-driven insights expose the politically motivated nature of claims linking recent budgetary decisions to tragic fatalities.

The Reality of Warnings and Response

Importantly, media reports confirm that local authorities and residents had ample warning of the impending severe weather event, over 12 hours of advanced notice.

"According to the National Weather Service website, the flash flood watch, which included Kerr County, was issued at 1:18 p.m. Thursday. Nearly 12 hours later, a "life threatening" flash flood warning was issued at 1:14 a.m., according to the website."

Despite this clear and timely warning, the emergency response and community preparedness failed catastrophically. The failure was one of planning, zoning, and infrastructure, not the availability or accuracy of weather data, nor GHG concentration.

Real Solutions, Not Climate Alarmism

The misdirection towards climate alarmism distracts from pragmatic, essential responses needed to safeguard lives and property. The tragedy at the girls' camp highlights dire deficiencies in land-use regulations and flood infrastructure. Building camps or residential areas within flood-prone valleys without adequate mitigation measures inevitably invites disaster.

Practical solutions exist: strengthening flood infrastructure, improving land-use zoning, investing in better emergency management systems, and implementing stricter regulations to restrict development in flood-prone areas. These solutions are immediate, actionable, and demonstrably effective, unlike vague climate-oriented rhetoric.

A Commitment to Continuous Data-Driven Updates

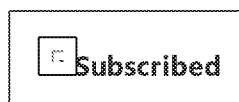
Moving forward, I commit to yearly updates analyzing new data on flooding events and fatalities, specifically to evaluate if the Trump administration's budget cuts directly contribute to increased flooding fatalities. When these updates definitively demonstrate that budgetary adjustments have not led to an increase in fatalities, it raises a critical question: Will those who perpetuate this misleading narrative be held accountable?

Subscribe today at [IrrationalFear.com](https://irrationalfear.com) to gain access to these critical yearly updates and nearly 400 detailed articles dedicated to dismantling climate misinformation. For the price of a single cup of coffee, equip yourself with the insights necessary to discern political narratives from scientific realities.

Thanks for reading Irrational Fear! This post is public so feel free to share it.

Share

Irrational Fear is a reader-supported publication. To receive new posts and support my work, consider becoming a free or paid subscriber.

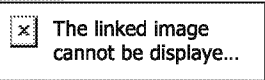
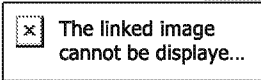


Thank you for your support. Irrational Fear is a reader-supported, independent publication. Please consider sharing Irrational Fear with your friends and family. Thank you, again!

Share Irrational Fear



© 2025 Dr. Matthew Wielicki
[Unsubscribe](#)



From: Ross McKittrick <ross.mckitrick@gmail.com>
Sent: Wednesday, April 30, 2025 4:03 PM
To: Judith Curry; Travis Fisher; John Christy; Roy W. Spencer; Steven Koonin
Subject: Global Greening
Attachments: 2 CO2 and greening.docx

Hi everyone

Here is my draft of CO2 and greening. There is a bit of overlap with the brief chapter on climate and agriculture, but it can be tidied up later.

I've put this and Roy's alkaline ocean chapter in the 00.Report Draft folder.

2 CO₂ fertilization and global greening

2.1 Photosynthesis and CO₂ levels

A key direct effect of adding CO₂ to the atmosphere is its positive effect on plant life via enhancement of photosynthesis and improvement to plant water use efficiency.

The term *photosynthesis* describes the process by which plants build biomass. The process requires carbon dioxide (CO₂), water (H₂O), and light. The plant enzyme responsible for photosynthesis is called Ribulose-1,5-bisphosphate-carboxylase/oxygenase or “Rubisco”. Photosynthesis is initiated when CO₂ is available at the surface of the RuBisCo enzyme where it is converted to a molecule with 3 carbon atoms and thereafter incorporated into plant mass, which is referred to as the C3 process.

Rubisco is estimated to have evolved about 3 billion years ago. Over geological time the Earth’s atmospheric CO₂ levels were usually much higher than they are today. About 400 million years ago CO₂ levels were an estimated 2,000-4,000 ppm and were at or above 1,000 ppm for much of the interval from 200 to 50 million years ago (Berner 2006, Judd et al. 2024). Over the past 35 million years the level of atmospheric CO₂ has been steadily declining. During glaciations levels have fallen as low as 170 ppm (Gerhart and Ward 2010). In response to low-CO₂ conditions some plants evolved another photosynthetic pathway called C4, in which CO₂ is concentrated in the vicinity of Rubisco allowing for the C3 process to function more efficiently. For agricultural purposes the plant categories are:

- C3: rice, wheat, soybeans and most other crops
- C4: maize (corn), sugar cane, millet, sorghum

Had atmospheric CO₂ levels continued declining, plant growth rates would have declined and eventually ceased. Below 180 ppm many C3 species experience growth rate reductions on the order of 40-60% compared to their growth rates at 350 ppm (Gerhart and Ward 2010). C3 plants have been observed under experimental conditions to stop growing altogether at levels between 60—140 ppm CO₂. Some C4 plants are still able to grow at levels even as low as 10 ppm, albeit very slowly (Gerhart and Ward 2010).

Currently, CO₂ levels are about 420 ppm, up from 280 ppm in the early 1800s. The positive response of plants to extra CO₂ is illustrated in Figure 1 which is reproduced from Gerhart and Ward (2010). It shows the growth effect of CO₂ on Velvetleaf (*Abutilon theophrasti*) seedlings over 14 days under controlled conditions where only the CO₂ exposure is varied. The gains exhibited from increasing CO₂ from 150 ppm to 350 ppm continue under a further doubling to 700 ppm.

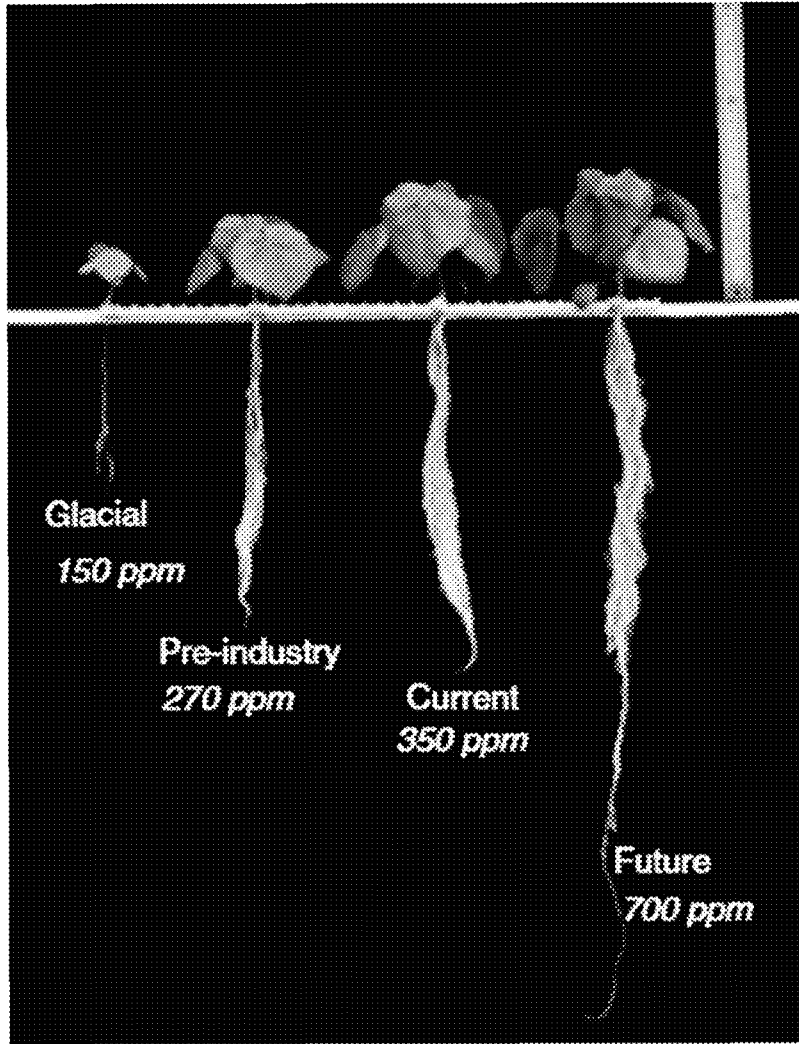


Figure 2.1: growth of *Abutilon theophrasti* after 14 days under identical conditions but for the indicated variations in CO₂ levels. Source: Gerhart and Ward (2010).

Over the past 60+ years there have been tens of thousands of studies on the response of plants to rising CO₂ levels. The overwhelming theme is that plants, especially C3 plants, benefit from extra CO₂. There are two mechanisms by which CO₂ confers a growth benefit:

- Enhanced photosynthesis via the metabolic pathways described above.
- Increased water use efficiency. This arises because plants draw in CO₂ by opening the stomata (pores) on the leaf surface. When CO₂ is scarce the stomata must be kept wide open for long periods, which allows water to evaporate away. Under enriched CO₂ conditions the stomata are closed for longer periods helping the plant retain water longer, thereby increasing water use efficiency.

One of the ways in which scientists have studied the effects of CO₂ enrichment is through “free air enrichment experiment” or FACE plots, in which small chimneys are placed in fields surrounding plants and the growth response to elevated CO₂ under varying weather conditions are recorded. Ainsworth and Long (2021) summarize results from about 250 such studies. They conclude:

- “Across 186 independent studies of 18 C3 crops, elevation of [CO₂] by ca. 200 ppm caused a ca. 18% increase in yield under non-stress conditions.”
- “Legumes and root crops showed a greater increase and cereals less. Nitrogen deficiency reduced the average increase to 10%, as did warming by ca. 2°C.”

The authors reported that C4 plants mainly exhibited benefits during drought conditions. However additional evidence on corn growth under enhanced CO₂ levels will be provided below.

2.2 CO₂ and key global food crops

Rice

Lv (2020) analyzed experimental studies done on conventional rice plants in Japan and China. They found that the type of cultivar was a determining factor in quantifying the amount of response displayed, but all cultivar types showed positive yield response to elevated CO₂ levels. An additional 200 ppm CO₂ raised rice yields by 13.5%-32.8% for three common rice cultivars. A similar meta-analysis synthesis (Hu, 2021) was done for all available FACE studies on rice. On average, elevated CO₂ enhanced rice yields by 16.2% and improved their leaf photosynthesis. Hybrid rice displayed a greater yield enhancement (24.7%) than conventional rice (14.2%). The synthesis also revealed that yield response to elevated CO₂ was constrained by changes in nitrogen availability and temperatures. Ainsworth and Long (2021) argued that if farmers are careful in choosing the rice variety with the highest yield potential, they will show as much as 35% yield increase from an extra 200 ppm CO₂ compared to 14% without adaptation.

Potatoes

Lee (2020) grew potato plants under elevated CO₂ concentration and reported they “yielded a distinct increase in growth and development and canopy net photosynthetic rate during tuber initiation and bulking. Consequently, biomass and canopy net photosynthesis increased, and tuber yield increased by 20.3%. The CO₂Science.org website reports on 33 published experiments between 1988 and 2019 exposing potatoes to enriched CO₂ levels. Converted to a common +300ppm scale the average photosynthesis rate change was +50.3 percent.

Soybean

Studies on the impact of elevated CO₂ on Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) plants in the water-deficient region of Huang-Huai-Hai Plain, China, showed that elevated CO₂ concentrations resulted in improved photosynthesis rate, water use efficiency and growth (Li, 2013) under both normal conditions and drought conditions. The CO₂Science.org website reports on 108 published experiments between 1985 and 2019 exposing soybean to enriched CO₂ levels. Converted to a +300ppm common scale the average growth benefit was +50.9 percent. In addition there were 10 studies reporting on +600 ppm CO₂ enrichment, resulting in an average increase in photosynthesis of 90.3%.

Maize (corn)

The CO₂Science.org website reports on 28 published experiments between 1983 and 2018 exposing corn (*Zea mays* L.) to enriched CO₂ levels. Converted to a +300ppm common scale the average growth benefit was +23.7 percent. Corn also benefits from increased drought tolerance under elevated CO₂. An experimental study (Allen Jr, 2011) exposed plants to water stress conditions in sunlit controlled-environment chambers at 360 ppm (ambient) and 720 ppm

(elevated) CO₂. The drought stress caused a 41% loss of growth under ambient CO₂ but only a 13% loss under elevated CO₂.

Wheat

The CO2Science.org website reports on 92 published experiments between 1983 and 2020 exposing common wheat (*Triticum aestivum* L.) to enriched CO₂ levels. Converted to a +300ppm common scale the average growth benefit was +67.6 percent. Blandino (2020) measured the yield as well as nutritional quality of an “improver” hybrid wheat variety and its parents under elevated CO₂ levels (+166 ppm). They reported a grain yield increase of +16% but a 7% decrease in grain protein levels. But they found that the food quality of different wheat varieties responded differently to elevated CO₂ levels, so that with proper varietal selection end-users can select wheat types that best take advantage of the elevated CO₂.

Coffee

The CO2Science.org website reports on 18 published experiments between 2013 and 2020 exposing coffee (*Coffea arabica*) to enriched CO₂ levels. Converted to a +300ppm common scale the average growth benefit was +110.9 percent. To forecast the future impact of climate on coffee yields, Verhage (2017) analyzed yield data over 1989 to 2013 from 42 municipalities in Brazil. The study found that “yield losses due to high air temperatures and water deficit will increase, while losses due to frost will decrease. Nevertheless, extra losses are offset by the CO₂ fertilization effect, resulting in a net increase of the average Brazilian Arabica coffee yield of 0.8% to 1.48 t ha⁻¹ in 2040-2070”.

Specific effects of climate change on US agriculture will be reviewed in Chapter XX.

2.3 Rising CO₂ and crop water use efficiency

Deryng et al. (2016) surveyed evidence on crop water productivity (CWP), i.e. yield per unit of water used, drawing attention to the potential for CO₂ both to enhance photosynthesis and reduce leaf-level transpiration (water loss during leaf respiration). They surveyed all available FACE data on crop yield changes for Maize (corn), Wheat, Rice and Soybean, and combined it with crop model data simulating yield responses as of 2080 under the extreme RCP8.5 scenario in four growing regions (Tropics, Arid, Temperate and Cold) each of which were split into rainfed and irrigated sub-regions. In every region they reported that models without CO₂ fertilization predicted CWP losses but CO₂ fertilization more than offset them and once it was taken into account all regions showed a net CWP gain. Deryng et al (2016) also reported that negative impacts on wheat and soybean yields were fully offset by CWP gains, and mitigated by up to 90% for rice and 60% for maize.

Figure 2.2 shows their results. The gray bars report yield changes under warming alone and the green bars show the effects of warming after accounting for the CO₂ fertilization effect.

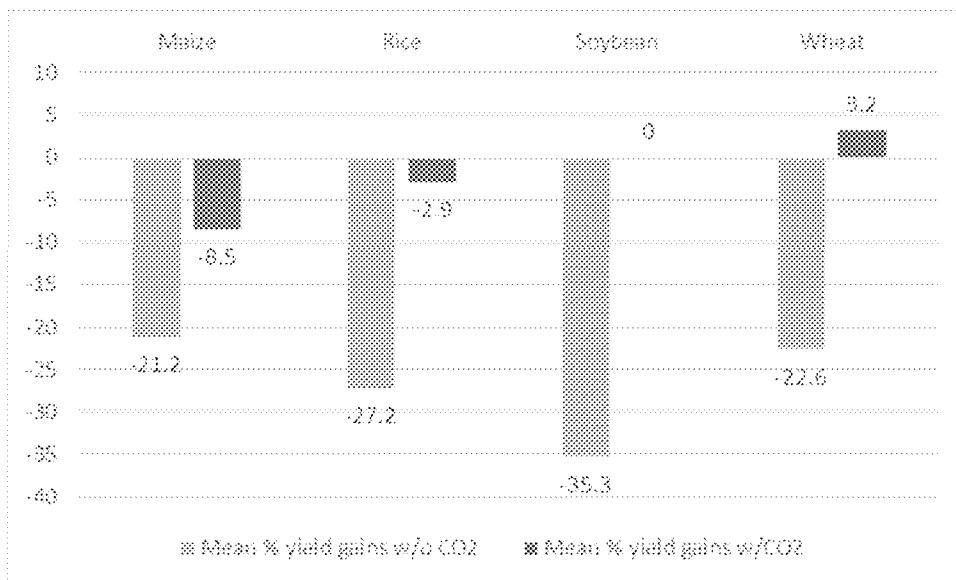


Figure 2.2: mean yield changes under RCP8.5 as of 2080 without CO₂ fertilization (gray) and with CO₂ fertilization (green). Data from Deryng et al. (2016).

Similar to this, Cheng et al. (2017) noted that increased global plant growth from 1982 to 2011 due to rising CO₂ uptake was accompanied by such large gains in CWP that despite the extra biomass global water use by plants had not increased.

Deryng et al. (2016) assumed that climate change would “exacerbate water scarcity”. It is noteworthy that while models predict drylands will expand under climate warming, current data show the opposite: greening is happening even in arid areas. Zhang et al. (2014) report that due to increased CO₂ levels “increasing aridity in drylands won’t lead to a general loss of vegetation productivity”; increased desertification will happen in at most 4% of currently arid areas.

2.4 CO₂ and global greening

“Greening” refers to an increase in the total amount of the Earth’s surface covered in plants. The main measure of greening is “Leaf Area Index” or LAI as measured by satellite. Many studies over the past decade have confirmed a global greening pattern (rising LAI) attributable to rising CO₂ levels. Zhu et al. (2016) was one of the first studies to report that global greening was detectable from space using satellite sensors. On data spanning 1982 to 2011 they detected greening over 25-50% of the Earth versus browning over only 4%, and they attributed 70% of the greening to rising CO₂ levels (see Figure 2.3).

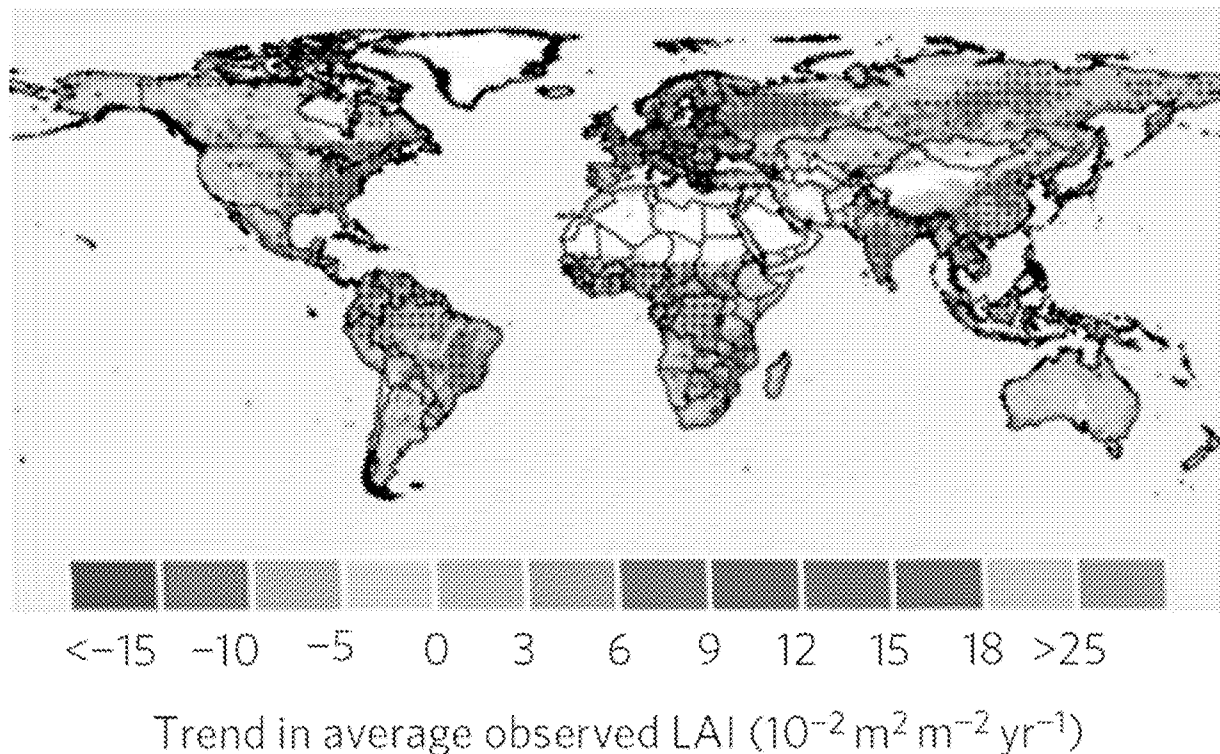


Figure 2.3: Trends in average Leaf Area Index (LAI). Source: Zhu et al. 2016 Figure 3.

Zheng (2017) confirmed the pattern, noting that greening over 30 years had added 8% to global leaf area and that greening was mitigating warming. Greening has been observed globally but Chen et al. (2019) noted that China and India were taking particular advantage of it though land management changes. Thus while China accounts for only 6.6% of global vegetated area it accounts for 25% of global net increase in LAI. Piao et al. (2020) noted that greening was even observable in the Arctic.

While plant models predict increases in photosynthesis should be observed in response to rising CO_2 , Haverd et al. (2020) reported that observed CO_2 fertilization rate was nearly double what models had predicted. That is, CO_2 fertilization had driven an increase in observed global photosynthesis by 30% since 1900, versus 17% predicted by plant models. Among other things this indicates that global models of the socioeconomic impacts of climate change have likely understated the benefits to crops and agriculture from rising CO_2 . The connection between CO_2 fertilization and climate policy will be discussed in Chapter XX.

Finally, Chen et al. surveyed claims that greening had slowed down since 2000 due to drought stress. They found instead that claims of slowed greening could be attributed to faulty satellite sensors. Once the data were corrected they found greening was accelerating over 55% of the world while browning was accelerating over only 7% of the world. Overall the greening trend was continuing with no evidence of slowdown, and CO_2 fertilization remained the dominant driver.

2.5 Concealment of CO₂ fertilization benefits in IPCC Reports

If CO₂ emissions were discovered to be causing global crop declines and regional browning we would almost certainly have seen it discussed prominently in IPCC reports, and indeed it likely would have been the subject of its own chapter in an Assessment Report if not an IPCC Special Report on its own. By contrast the IPCC has been almost silent on the topic of global greening.

The topic is briefly acknowledged in a few places in the body of the IPCC 6th Assessment Report but is omitted in all Summary documents. Based on word searches here is what the most recent IPCC Summary documents (AR6) had to say about it:

Working Group I Summary for Policymakers: No mention.

Working Group I Technical Summary: No mention of greening. CO₂ fertilization mentioned twice: as a contributor via plant growth to the land carbon sink and as a contributor to the increased amplitude of the seasonal CO₂ cycle.

Working Group II Summary for Policymakers: No mention of greening except the observation that adding forest cover to cities can locally reduce temperatures. No mention of CO₂ fertilization.

Working Group II Technical Summary: No mention.

AR6 Synthesis Report: No mention.

AR6 Summary of Synthesis Report: (called the “Longer Report”): No mention.

Section 2.3.4.3.3 of the AR6 Working Group I report is titled “global greening and browning.” It points out that the IPCC Special Report on Climate Change and Land had concluded with high confidence that greening had increased globally over the past 2-3 decades. It then discusses the various estimate of greening trends, notes that there are variations in the estimates among data sets and then says that while they have high confidence greening has occurred they have low confidence in the magnitude of the trend. There are also brief mentions of CO₂ fertilization effects and improvements in water use efficiency in a few other chapters in the AR6 Working Groups I and II Reports. But as noted, despite the volume of supporting evidence, news about global greening, improved plant water use efficiency and gains in crop production is omitted from the Summaries for Policymakers.

References

- Ainsworth, Elizabeth and Stephen P. Long (2020) 30 years of free-air carbon dioxide enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? *Global Change Biology* <https://doi.org/10.1111/gcb.15375>
- Allen Jr, L. K. (2011). Elevated CO₂ increases water use efficiency by sustaining photosynthesis of water-limited maize and sorghum. *Journal of Plant physiology*, 168(16), 1909-1918.
- Berner, R.A. GEOCARBSULF: A combined model for Phanerozoic atmospheric O₂ and CO₂. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70 (2006) 5653–5664.
- Blandino, M. B. (2020). Elevated CO₂ impact on common wheat (*Triticum aestivum* L.) yield, wholemeal quality, and sanitary risk. *Journal of agricultural and food chemistry*, 68(39), 10574-10585.
- Chen, Chi et al. (2019) China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature sustainability* 2:122-129 <https://www.nature.com/articles/s41893-019-0220-7>

- Chen, Xin et al. (2024) The global greening continues despite increased drought stress since 2000. *Global Ecology and Conservation* 49 e02791 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351989423004262>
- Cheng, L., Zhang, L., Wang, YP. et al. Recent increases in terrestrial carbon uptake at little cost to the water cycle. *Nature Communications* 8, 110 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00114-5>
- Deryng, Delphine and 15 coauthors (2016) Regional disparities in the beneficial effects of rising CO₂ concentrations on crop water productivity. *Nature Climate Change* 18 April 2016 DOI: 10.1038/NCLIMATE2995.
- Gerhart, Laci and Joy Ward (2010) Plant responses to low [CO₂] of the past. *New Phytologist* 188:674—695. <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1469-8137.2010.03441.x>
- Haverd, Vanessa et al. (2020) Higher than expected CO₂ fertilization inferred from leaf to global observations. *Global Change Biology* 26: 2390–2402.
- Hu, S. W. (2021). Response of rice yield traits to elevated atmospheric CO₂ concentration and its interaction with cultivar, nitrogen application rate and temperature: a meta-analysis of 20 years FACE studies. *Science of the Total Environment*, 764, 142797.
- Judd, Emily et al. (2024) A 485-million-year history of Earth's surface temperature. *Science* 385 Issue 6715 <https://doi.org/10.1126/science.adk3705>
- Lee, Y. S. (2020). The effect of concurrent elevation in CO₂ and temperature on the growth, photosynthesis, and yield of potato crops. *PLoS One*, 15(10), e0241081.
- Li, D. L. (2013). Effects of elevated CO₂ on the growth, seed yield, and water use efficiency of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) under drought stress. *Agricultural Water Management*, 129, 105-112.
- Lv, C. H. (2020). Response of rice yield and yield components to elevated [CO₂]: a synthesis of updated data from FACE experiments. *European Journal of Agronomy*, 112, 125961.
- Piao Shilong et al. (2020) Characteristics, drivers and feedbacks of global greening *Nature Reviews Earth & Environment* 1:14-27
- Verhage, F. Y. (2017, November). Carbon dioxide fertilization offsets negative impacts of climate change on Arabica coffee yield in Brazil. Retrieved October 2024, from esalq: [http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/eventos/Thesis Report - Fabian Verhage.pdf](http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/eventos/Thesis%20Report%20-%20Fabian%20Verhage.pdf)
- Zeng, Zhenzhong et al. (2017) Climate mitigation from vegetation biophysical feedbacks during the past three decades. *Nature Climate Change* 7:432-436 May 2017 <https://www.nature.com/articles/nclimate3299>
- Zhang et al. (2024) Less than 4% of dryland areas are projected to desertify despite increased aridity under climate change. *Nature Communications Earth and Environment* 5 June 2024 <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01463-y>
- Zhu, Zaichun et al. (2016) Greening of the Earth and its drivers. *Nature Climate Change* 6 Aug 2016 <https://www.nature.com/articles/nclimate3004>

From: Ross McKittrick [ross.mckittrick@gmail.com]
Sent: 5/15/2025 7:44:45 PM
To: Roy W. Spencer [roywspencer@hotmail.com]; John Christy [climateman60@gmail.com]; Steven Koonin [steven.koonin@gmail.com]; Travis Fisher [travis.scott.fisher@gmail.com]; Judith Curry [curry.judith@gmail.com]
Subject: glossary
Attachments: Glossary.May15.[RM].docx

A few revisions to the Glossary.

GLOSSARY

2XCO₂: doubling of the atmospheric CO₂ content relative to pre-Industrial times, a commonly used baseline for addressing climate change. In 2025, atmospheric CO₂ concentrations were approximately 50% of the way to 2XCO₂.

ABATEMENT: in the context of environmental policy the reduction of emissions

ACE (Accumulated Cyclone Energy): a statistical measure of a tropical cyclone's energy accumulated over its lifetime, calculated from a summation of the square of maximum sustained wind speeds

ACIDIFICATION: a commonly used term for the reduction in ocean pH from more alkaline to less alkaline values

AEROSOLS: tiny solid or liquid particles suspended in the air

ALKALINE: having a chemical pH greater than 7.0. The "opposite" of acidic, which means a pH less than 7.0

AMBIENT: relating to the immediate surroundings of something

ANTHROPOGENIC: created by humans

AR (IPCC Assessment Reports): periodic assessments published by the IPCC evaluating current knowledge of the climate system, global change, and associated issues. An AR now consists of reports from three working groups, the first (WG1) concerned with physical science. The most recent was the AR6.

ATTRIBUTION: assertion of a causal relation, chiefly from anthropogenic GHG emissions to observed climate patterns.

AUTOCORRELATION: the phenomenon in which the current value of a random time series variable is correlated with its value in a previous time period.

BIOMASS: the total quantity or weight of organic matter in a given area or volume

CARBON: The 6th element in the periodic table. Popularly used as a shorthand term for carbon dioxide

CMIP (Coupled Model Intercomparison Project): The IPCC's organized effort to compare many different global ocean-atmosphere climate models when they are all forced with the same emissions scenario(s). The two most recent were the CMIP5 and CMIP6 for, respectively, AR5 and AR6.

CONUS: the contiguous 48 U.S. states

DICE (Dynamic Integrated model of the Climate and Economy): An Integrated Assessment Model (IAM) developed by William Nordhaus in 1993.

DISCOUNT RATE: The interest rate used to convert future costs and benefits of environmental regulations into their present value. Varies inversely with present value so a high discount rate reduces the present value of future costs and benefits.

DRY ICE: frozen carbon dioxide

ECONOMETRICS: the branch of economics concerned with the use of statistical methods (chiefly multiple regression) to analyse economic systems

ECS (Equilibrium Climate Sensitivity): The total amount of eventual global-average surface warming in response to a hypothetical doubling of the atmospheric CO₂ concentration compared to pre-Industrial levels.

EL NIÑO: the warm phase of ENSO, involving weaker upwelling of cold water off the South American coast and weaker Pacific trade winds.

EMISSIONS SCENARIO: An assumed scenario of future greenhouse gas emissions (or resulting atmospheric concentrations) based upon assumptions regarding global economic activity, the prevalence of fossil fuel use, and (sometimes) global carbon cycle model estimates of the rate of CO₂ uptake by land and ocean.

ENDANGERMENT FINDING (EF): the 2009 finding by the Administrator of the EPA that CO₂ emissions endanger human health and welfare

ENSO: El Niño – Southern Oscillation, a prominent natural climate fluctuation involving year-to-year variations in the upwelling of cold water off the equatorial coast of South America and associated strengthening or weakening of trade winds across the Pacific Ocean

FACE: (Free-Air CO₂ Enrichment) large-scale open-air studies that expose plants to elevated CO₂ levels, simulating future climate scenarios.

FOSSIL FUEL: a natural hydrocarbon fuel such as coal or natural gas formed in the geological past from the remains of living organisms

FUND: An Integrated Assessment Model (IAM) developed by Richard Tol in 1997.

GBR (Great Barrier Reef): the world's largest coral reef ecosystem located off the northeast coast of Australia

GDP (Gross Domestic Product): total market value of all the final goods and services produced within a country's border, usually over one year

GHCN: the Global Historical Climatology Network, consisting of a time-varying number of globally distributed weather stations making hourly, daily, or monthly measurements of precipitation, temperature and sometimes snowfall and snow depth.

GLOBAL GREENING: the satellite-observed increase in greenness in most vegetated land areas observed since the early 1980s

GNP (Gross National Product): total market value of all the final goods and services produced by the citizens a country, usually over one year

GREENHOUSE EFFECT (GHE): the tendency for any planetary atmosphere containing greenhouse gases to be warmer in the lowest layers than if those gases did not exist.

GREENHOUSE GAS (GHG): an atmospheric gas that absorbs and emits infrared (IR) radiation, especially water vapor, CO₂, and methane.

HURST PHENOMENON: see long term persistence.

HYDROLOGY: the study of the movement of water, especially on land and the atmosphere

IAM (Integrated Assessment Model): a computerized tool that combines economics, climate science, and social sciences to provide quantitative relationships between human and Earth systems, helping to inform policy decisions

IEA: International Energy Agency

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): A panel of international experts and governmental representatives established by the United Nations and World Meteorological Organization in 1988 to provide governments at all levels with scientific information that they can use to develop climate policies

IR (Infrared): heat radiation that all solid objects and greenhouse gases emit by virtue of their temperature.

LA NIÑA: the cool phase of ENSO, involving stronger upwelling of cold water off the South American coast and stronger Pacific trade winds.

LONG TERM PERSISTENCE (LTP, or HURST PHENOMENON): a form of autocorrelation in which random fluctuations induce long term but not permanent changes in the mean value of a series, which shows up in some climate data series as cyclical or trending patterns on short time scales

MAIZE: corn

MODEL: a computer code or collection of codes which quantify our knowledge of various processes and the interactions between those processes

MORTALITY: death or number of deaths, usually expressed for a specific population and period

NCA (National Climate Assessment): A periodic report mandated by the Global Change Research Act of 1990 summarizing the impact of climate change on the United States> There have been five NCA reports: NCA1 (2000), NCA2 (2009), NCA3 (2014), NCA4 (2017-18), and NCA5 (2023)

OECD (Organization for Economic Cooperation and Development): a specific list of 38 countries having a democratic system of government and free economic systems

PALEOCLIMATE: climate of the distant past, before modern weather instruments were widely used (typically pre-1850), necessitating the use of “proxy” measurements such as tree rings, ice core, pollen records, etc.

PDI (Power Dissipation Index): a statistical estimate of the accumulated destructive potential of a tropical cyclone over time, calculated as a summation of the cube of the maximum sustained wind speeds

PHOTOSYNTHESIS: the process by which plants grow, requiring carbon dioxide, water, and light at sufficiently warm temperatures (10 to 35 deg. C for optimal function)

PPM: parts per million, a measure of the concentration of a substance in (for example) the atmosphere

PRE-INDUSTRIAL: the historical period before which human greenhouse gas emissions were considered significant, usually assumed to be the mid-1700s

RADIATIVE FEEDBACK: a change in the balance between absorbed solar radiation and emitted infrared (IR) radiation, referenced to the top of the atmosphere, caused by changes in surface temperature

RADIATIVE FORCING: the change in the balance between absorbed solar radiation and emitted infrared (IR) radiation, referenced to the top of the atmosphere, caused by changes in greenhouse gases, anthropogenic aerosols, volcanoes, etc.

RCP SCENARIOS: Representative Concentration Pathways, different scenarios for future greenhouse gas emissions and their impact on the atmosphere, introduced in the IPCC's Fifth Assessment Report (AR5). RCP scenarios have a number label (e.g. RCP6.0) indicating how much radiative forcing they assume in 2100 relative to pre-Industrial times, in Watts per sq. meter. RCP4.5 and RCP6.0 are intermediate scenarios, whereas RCP8.5 is an extreme scenario with very large future emissions of greenhouse gases.

REGRESSION: A statistical method for selecting the coefficients of a linear equation to explain the behaviour of a dependent variable in terms of variations in one or more explanatory variables.

RICARDIAN ANALYSIS: a method used in environmental economics named after David Ricardo to estimate the economic impacts of climate change, particularly on agriculture, by making use of the hypothesis that expected changes in the return to future agricultural activity will be capitalized into current land values.

SOCIAL COST OF CARBON (SCC): an estimate of the total economic damages, measured in dollars, caused by emitting one additional ton of CO₂ into the atmosphere

SSP SCENARIOS: Shared Socioeconomic Pathways, different scenarios for future greenhouse gas emissions and their impact on the atmosphere, introduced in the IPCC's Sixth Assessment Report (AR6). Some of the SSP scenarios are analogous to the older RCP scenarios, for purposes of continuity and comparison to earlier climate model assessments.

TC: tropical cyclone

TMAX: the daily maximum surface air temperature

TMIN: the daily minimum surface air temperature

TOA: top of atmosphere

TOXICOLOGY: the study of the adverse effects of chemical substances on living organisms.

TREND: a coefficient, usually estimated using linear regression, representing the slope of a line of best fit through a time series of data, indicating any tendency for the series mean to move up or down over time.

UHI (Urban Heat Island): the tendency for inhabited areas to be warmer than their rural surroundings, due to the replacement of natural land and vegetation with roads, parking lots, buildings, and waste heat sources.

USHCN: the U.S. Historical Climatology Network, consisting of quality-controlled temperature and precipitation data from 1,218 surface weather stations

From: Roy Spencer <roywspencer@hotmail.com>
Sent: Wednesday, May 7, 2025 6:46 AM
To: Steven Koonin; John Christy
Cc: Ross McKittrick; Judith Curry; Travis Fisher
Subject: Glossary
Attachments: GLOSSARY [RS].docx

Attached is my first cut at a glossary, 64 terms so far based upon my reading of the chapters.

I've omitted obvious things like EPA, CO2, NOAA, NASA...

I'm sure I missed a few terms, and feel free to make edits.

Of course, this could all wait until everything else is completed.

-Roy

From: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>
Sent: Tuesday, May 6, 2025 9:02 PM
To: John Christy <climateman60@gmail.com>
Cc: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>; Judith Curry <curry.judith@gmail.com>; Roy W. Spencer <roywspencer@hotmail.com>; Travis Fisher <travis.scott.fisher@gmail.com>
Subject: Re: Ch 8 Extreme weather

I was expecting to read/comment/edit Chapter 8 tomorrow (Wednesday), so I'll use this version. Roy, if you beat me to a summary, that's fine, else I'll take it on.

John, do decouple for at least a few days. I've made the mistake of not doing so on a few vacations, with great regrets afterward.

Steven Koonin

On May 6, 2025, at 21:53, John Christy <climateman60@gmail.com> wrote:

All

Here is a cleaned up version of chapter 8 which you will likely not see until 7 May, so that is the date.

My preference is for someone to read the thing and write the summary (8.4) based upon what a fresh set of eyes would conclude. Steve? Roy?

Ross. The panel charts of the individual station precipitation take up a lot of real estate and I think the value per acre is low. Since you calculated 3 statistics for each station, could you craft a bar chart or something to show that result? You would then have 9 charts, one for each of the 3 statistics and one each of the three regions. The nine charts may be panelized and fit on one

plot. I know for us it's important for people to see the actual data (which is why I had those colored bar charts - now monochromatic), but it may be overkill for this document.

As to one of the statistics, I believe 3-day totals will be more meaningful and accurate than 1-day totals. I could send you a file of the heaviest 3-day total for each station and each year and you can do the analysis from there.

I especially like the way you parsed the Sidebar and I hope smart people will finally understand that when dealing with climate, our sample is pathetically small from which to draw hard conclusions.

I also enjoyed the added words on LTP. In fact do you have a few sentences that expand that a little to talk about the erratic nature of precipitation (spatial and temporal) in fancy statistical terms which means finding statistical significance in such a variable is a tough job?

I redid the number-of-event bar charts - all one color now.

I reran the Heatwave results to use 6-day periods as did NCA5. NCA5 was slick though. By choosing 1961-90 their background climatology was cold relative to decades before and since, so that results outside of those 30 years would produce a lot of days that exceed the percentile threshold. Then in the urban heatwave website, they started in 1960, assuring a result that more temps would exceed the threshold in post-1990 years.

That's all I've got.

Aloha

John C.

John Christy
Director, Earth System Science Center
Professor, Atmos and Earth Science
Alabama State Climatologist
The University of Alabama in Huntsville
climatemanager60@gmail.com

<8 Extreme weather.JRC.May07.docx>

On May 6, 2025, at 5:25 PM, John Christy <climatemanager60@gmail.com> wrote:

Steve

As Ross notes, the precipitation section is simply an update of our 2019 paper. The daily temperature work from the supplemented USHCN records is in a paper under review (but I suspect will have difficulty being accepted). The data are from the official USHCN site with my supplements adding about 10 percent to cover the missing data. There are about 41 million temperatures here, so I

added about 4 million. Thus the results are dominated by publically-available data for others to check. If I get the go-ahead for publication, I can put the complete datafiles on a server for anyone to use.

John C.

John Christy
Director, Earth System Science Center
Professor, Atmos and Earth Science
Alabama State Climatologist
The University of Alabama in Huntsville
climateman60@gmail.com

On May 6, 2025, at 3:48 PM, Ross McKittrick
<ross.mckittrick@gmail.com> wrote:

The underlying analysis is all from John's and my Journal of Hydrology paper for which the code is already online. John updated and expanded the data sets and I ran them through the same code.

On Tue, May 6, 2025 at 4:41 PM Steven Koonin
<steven.koonin@gmail.com> wrote:

A thought about the analysis of long-term CONUS data, which as John knows I like very much:

If some (most?) of this work is as-yet unpublished in a peer-reviewed journal, I'd think you've got to make the expanded and in-filled database (and analysis code?) publicly accessible so that the work can be checked. Are you prepared to do that (at least for the "final", if not the "draft")?

SEK

From: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>
Sent: Tuesday, May 6, 2025 1:05 PM
To: John Christy <climateman60@gmail.com>
Cc: Judith Curry <curry.judith@gmail.com>; Roy W. Spencer <roywspencer@hotmail.com>; Travis Fisher <travis.scott.fisher@gmail.com>; Steven Koonin <steven.koonin@googlemail.com>
Subject: Re: Ch 8 Extreme weather

Here's another edition of Ch 8 on extremes taking Judy's and John's points into account. The IPCC/NCA review is ported to an Appendix. I added a paragraph about LTP to the intro. I've

incorporated the NE data. The bulk of the chapter is John's US temperature and precip data analysis with some additional material on wildfires, drought and TCs. For the US temperature extremes I moved the range figure to come just after the hot/cold extremes count because I think they both make a coherent point namely that the US becoming less extreme because heat events are rising more slowly than cold events are warming. There will still need to be an overall chapter summary but I'm going to move on to other chapters now. I'll put this in the Dropbox.

On Tue, May 6, 2025 at 12:12 PM John Christy
<climateman60@gmail.com> wrote:

All

We can fill in without much trouble the change, or lack thereof, of “high impact” weather events (mainly wind and flooding like hurricanes, tornadoes etc) in the CONUS Extreme chapter. The temp and precip metrics are important because they are just long enough to essentially tell us Mother Nature has a mind of her own.

1. I'll look at Ross's version of 8 soon, but my hope was that Ross would translate the statistical remarks into the correct language(eg are their more precise words that chaotic, episodic, stochastic, etc).

2. We have analyses of the CONUS with more complete datasets than the NCA used (recall NCA analyses depended essentially on a small group at NCEI using datasets that (a) were not very consistent in time, (b) could promote alarm and (c) already easy for them to get to. Our datasets have literally hundreds of thousands of manually keyed-in observations for temporal consistency. In other words, this lets people know we can address these issues from soup to nuts - we're not armchair climate scientists ... we can reproduce what they did, but make the analysis more comprehensive to address the questions.

John C.

Sent from my iPhone

On May 6, 2025, at 4:14 AM, Ross McKittrick

<ross.mckittrick@gmail.com> wrote:

Just read your attribution chapter. I hadn't picked up on the gap between IPCC Ch 11 vs Ch 12 language but i see your point that rather than promoting one set of attribution findings we should explain that even within the same AR different authors assessed things differently. One option is to leave Ch 6 where it is but reverse the order of Ch 7 and 8 while retitling the latter as you suggest. That way, having established the extreme weather types for which there are no detectable trends it will more naturally follow that they won't be discussed in the attribution chapter.

On Tue, May 6, 2025 at 9:45 AM Judith Curry
<curry.judith@gmail.com> wrote:

Ok, but the summary table (12.12 from AR6) is inconsistent with conclusions in AR6 ch 11 (I point this out in section 6.4 of my attribution chapter).

In my mind, the main point is disagreement and ambiguity I would suggest chapter 8 going before chapter 6, retitling it as US Weather and Climate Extremes, and make it more of a data chapter, not an attribution chapter (I would put table 12.12 in the attribution chapter if you want to include the actual table)

On Tue, May 6, 2025 at 6:39 AM Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com> wrote:

I like john's material too which is why I included it and am working on the extended regional analyses. But on this topic people are heavily primed to believe that extreme weather of all kinds is getting worse due to climate change. The assertion shows up everywhere climate change is discussed including in academic papers. I think it is very valuable to show people that neither the IPCC nor the NCA support such this view. We should at least lead off with the summary table. The library of quotes can go to an appendix but I have found in my public speaking that they have considerable persuasive force for most people. We also need to address floods, droughts, hurricane landfalls, tornadoes etc. I don't see any reason to delete all that material.

On Tue, May 6, 2025 at 9:22 AM Judith Curry
<curry.judith@gmail.com> wrote:

I actually liked John's chapter. I would have retitled it "US temperature and rainfall extremes"

I think this is more relevant than a complete rehash of everything the last 3 IPCC reports have stated for every conceivable severe weather event.

John's version meshes very well with my version of chapter 6. Read especially section 6.4 of my chapter. I note a discrepancy between chapters 11 and 12 in terms of detecting and attributing extreme events. This is the main point in my opinion, there is ambiguity in all this. Lets focus on pointing out the problems/challenges, and topics that are particularly relevant for the US

On Mon, May 5, 2025 at 7:47 PM Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com> wrote:

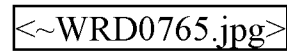
I have wrangled the extreme weather chapter into something I hope flows better and is more readable. I adopted Judy's editorial changes and then the new changes I made are in red. I added some new Figures showing results on PC and SE data and will add the NE chart when I get the data. I also made some labeling suggestions including for the 3 rainfall charts that are hard to understand. Section summaries and an overall summary are still needed.

Ross

--

Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

<~WRD0765.jpg>

--


Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

GLOSSARY

2XCO₂: doubling of the atmospheric CO₂ content relative to pre-Industrial times, a commonly used baseline for addressing climate change. In 2025, atmospheric CO₂ concentrations were approximately 50% of the way to 2XCO₂.

ABATEMENT: in the context of pollution, the reduction of harmful impacts through pollution reductions

ACE (Accumulated Cyclone Energy): a statistical measure of a tropical cyclone's energy accumulated over its lifetime, calculated from a summation of the square of maximum sustained wind speeds

ACIDIFICATION: a commonly used term for the reduction in ocean pH from more alkaline to less alkaline values

AEROSOLS: tiny solid or liquid particles suspended in the air

ALKALINE: having a chemical pH greater than 7.0. The "opposite" of acidic, which means a pH less than 7.0

AMBIENT: relating to the immediate surroundings of something

ANTHROPOGENIC: created by humans

AR (IPCC Assessment Reports): periodic assessments published by the IPCC evaluating current knowledge of the climate system, global change, and associated issues. The most recent was AR6 in 2023.

BIOMASS: the total quantity or weight of organic matter in a given area or volume

CARBON: popular and widely used shorthand term for carbon dioxide

CMIP (Coupled Model Intercomparison Project): The IPCC's organized effort to compare many different global ocean-atmosphere climate models when they are all forced with the same emissions scenario(s)

CONUS: the contiguous 48 U.S. states

DICE (Dynamic Integrated model of the Climate and Economy): An Integrated Assessment Model (IAM) developed by William Nordhaus in 1993.

DISCOUNT RATE: here, the rate used to convert future costs and benefits of environmental regulations into their present value. A high discount rate reduces the present value of future environmental benefits from regulating sooner; a low discount rate favors long-term benefits of regulating sooner.

DRY ICE: frozen carbon dioxide

ECONOMETRICS: the branch of economics concerned with the use of math and statistics in describing economic systems

ECS (Equilibrium Climate Sensitivity): The total amount of eventual global-average surface warming in response to a hypothetical doubling of the atmospheric CO₂ concentration compared to pre-Industrial levels.

EL NIÑO: the warm phase of ENSO, involving weaker upwelling of cold water off the South American coast and weaker Pacific trade winds.

EMISSIONS SCENARIO: An assumed scenario of future greenhouse gas emissions (or resulting atmospheric concentrations) based upon assumptions regarding global economic activity, the prevalence of fossil fuel use, and (sometimes) global carbon cycle model estimates of the rate of CO₂ uptake by land and ocean.

ENDANGERMENT FINDING (EF): the 2009 finding by the Administrator of the EPA that CO₂ emissions endanger human health and welfare

ENSO: El Niño – Southern Oscillation, a prominent natural climate fluctuation involving year-to-year variations in the upwelling of cold water off the equatorial coast of South America and associated strengthening or weakening of trade winds across the Pacific Ocean

FACE: (Free-Air CO₂ Enrichment) large-scale open-air studies that expose plants to elevated CO₂ levels, simulating future climate scenarios.

FOSSIL FUEL: a natural fuel such as coal or natural gas formed in the geological past from the remains of living organisms

FUND: An Integrated Assessment Model (IAM) developed by Richard Tol in 1997.

GBR (Great Barrier Reef): the world's largest coral reef ecosystem located off the northeast coast of Australia

GDP (Gross Domestic Product): total market value of all the final goods and services produced within a country's border, usually over one year

GHCN: the Global Historical Climatology Network, consisting of a time-varying number of globally distributed weather stations making hourly, daily, or monthly measurements of precipitation, temperature and sometimes snowfall and snow depth.

GLOBAL GREENING: the satellite-observed increase in greenness in most vegetated land areas observed since the early 1980s

GNP (Gross National Product): total market value of all the final goods and services produced by the citizens a country, usually over one year

GREENHOUSE EFFECT (GHE): the tendency for any planetary atmosphere containing greenhouse gases to be warmer in the lowest layers than if those gases did not exist.

GREENHOUSE GAS (GHG): an atmospheric gas that absorbs and emits infrared (IR) radiation, especially water vapor, CO₂, and methane.

HURST PHENOMENON: see long term persistence.

HYDROLOGY: the study of the movement of water, especially on land and the atmosphere

IAM (Integrated Assessment Model): a computerized tool that combines economics, climate science, and social sciences to provide quantitative relationships between human and Earth systems, helping to inform policy decisions

IEA: International Energy Agency

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): A panel of international experts and governmental representatives established by the United Nations and World Meteorological Organization in 1988 to provide governments at all levels with scientific information that they can use to develop climate policies

IR (Infrared): heat radiation that all solid objects and greenhouse gases emit by virtue of their temperature.

LA NIÑA: the cool phase of ENSO, involving stronger upwelling of cold water off the South American coast and stronger Pacific trade winds.

LONG TERM PERSISTENCE (LTP, or HURST PHENOMENON): the tendency for natural systems such as precipitation, droughts, and floods to have persisting behavior over time, as opposed to random behavior, which impacts our interpretation of long-term trends in climate data

MAIZE: corn

MODEL: a computer code or collection of codes which quantify our knowledge of various processes and the interactions between those processes

MORTALITY: death or number of deaths, usually expressed for a specific population and period

NCA (National Climate Assessment): A periodic report mandated by the Global Change Research Act of 1990 summarizing the impact of climate change on the United States> There have been five NCA reports: NCA1 (2000), NCA2 (2009), NCA3 (2014), NCA4 (2017-18), and NCA5 (2023)

OECD (Organization for Economic Cooperation and Development): a specific list of 38 countries having a democratic system of government and free economic systems

PALEOCLIMATE: climate of the distant past, before modern weather instruments were widely used (typically pre-1850), necessitating the use of “proxy” measurements such as tree rings, ice core, pollen records, etc.

PDI (Power Dissipation Index): a statistical estimate of the accumulated destructive potential of a tropical cyclone over time, calculated as a summation of the cube of the maximum sustained wind speeds

PHOTOSYNTHESIS: the process by which plants grow, requiring carbon dioxide, water, and light at sufficiently warm temperatures (10 to 35 deg. C for optimal function)

PPM: parts per million, a measure of the concentration of a substance in (for example) the atmosphere

PRE-INDUSTRIAL: the historical period before which human greenhouse gas emissions were considered significant, usually assumed to be the mid-1700s

RADIATIVE FEEDBACK: a change in the balance between absorbed solar radiation and emitted infrared (IR) radiation, referenced to the top of the atmosphere, caused by changes in surface temperature

RADIATIVE FORCING: the change in the balance between absorbed solar radiation and emitted infrared (IR) radiation, referenced to the top of the atmosphere, caused by changes in greenhouse gases, anthropogenic aerosols, volcanoes, etc.

RCP SCENARIOS: Representative Concentration Pathways, different scenarios for future greenhouse gas emissions and their impact on the atmosphere, introduced in the IPCC's Fifth Assessment Report (AR5). RCP scenarios have a number label (e.g. RCP6.0) indicating how much radiative forcing they assume in 2100 relative to pre-Industrial times, in Watts per sq. meter. RCP4.5 and RCP6.0 are intermediate scenarios, whereas RCP8.5 is an extreme scenario with very large future emissions of greenhouse gases.

RICARDIAN ANALYSIS: a method used in environmental economics to estimate the economic impacts of climate change, particularly on agriculture

SOCIAL COST OF CARBON (SCC): an estimate of the total economic damages, measured in dollars, caused by emitting one additional ton of CO₂ into the atmosphere

SSP SCENARIOS: Shared Socioeconomic Pathways, different scenarios for future greenhouse gas emissions and their impact on the atmosphere, introduced in the IPCC's Sixth Assessment Report (AR6). Some of the SSP scenarios are analogous to the older RCP scenarios, for purposes of continuity and comparison to earlier climate model assessments.

TC: tropical cyclone

TMAX: the daily maximum surface air temperature

TMIN: the daily minimum surface air temperature

TOA: top of atmosphere

TOXICOLOGY: the study of the adverse effects of chemical substances on living organisms.

TREND: usually, the linear regression slope fit to a time series of data, one of the most commonly used metrics to describe climate change over a long period of time

UHI (Urban Heat Island): the tendency for inhabited areas to be warmer than their rural surroundings, due to the replacement of natural land and vegetation with roads, parking lots, buildings, and waste heat sources.

USHCN: the U.S. Historical Climatology Network, consisting of quality-controlled temperature and precipitation data from 1,218 surface weather stations

From: Ross McKittrick [ross.mckittrick@gmail.com]
Sent: 5/9/2025 4:59:38 PM
To: Judith Curry [curry.judith@gmail.com]; Steven Koonin [steven.koonin@gmail.com]; John Christy [climatemanager60@gmail.com]; Roy W. Spencer [roywspencer@hotmail.com]; Travis Fisher [travis.scott.fisher@gmail.com]
Subject: heat-related mortality
Attachments: 12.heat_cold mortality.May9[RM].docx

I added some additional information on declining heat-related mortality trends and the role of adaptation for future projections to the Ch on heat-related mortality. see attached

12 Mortality from temperature extremes

12.1 Heat and cold risks

Changes in temperature extremes are among the most certain impacts expected in a warming globe -- extreme heat events are expected to become more frequent while extreme cold events become less frequent. This pattern is evident in the historical period (as discussed in Section XX) and is expected to intensify with continued warming.

Mortality during heat extremes is typically caused by heat stroke and heat exhaustion, while mortality during cold extremes is typically caused by hypothermia and heart strain. It is well known that global mortality is substantially greater for extreme cold than for extreme heat.^{1,2}

Specific to the U.S., extreme heat and extreme cold both kill hundreds of people each year.; however, different approaches to assessing heat/cold mortality produces different results. The Center for Disease Control (CDC) National Center for Health Statistics Compressed Mortality Database, which is based on death certificates, indicates that about twice as many people die of “excessive cold” conditions in a given year than of “excessive heat.”^{3,4}

A 2015 epidemiological study of deaths in published in *The Lancet* found that cold-related deaths in the U.S. were about a factor of fifteen higher than heat-related deaths.⁵ However, the study did not adjust for the seasonal cycle in mortality rates, which tend to increase during the winter months due to non-weather factors like influenza.⁶ A more recent paper found that 86% of temperature-related deaths in the U.S. are due to cold-related mortality.⁷

¹ Qi Zhao et al., “Global, Regional, and National Burden of Mortality Associated with Non-Optimal Ambient Temperatures from 2000 to 2019: A Three-Stage Modelling Study,” *The Lancet Planetary Health* 5, no. 7 (July 2021), [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(21\)00081-4](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(21)00081-4).

² <https://ourworldindata.org/part-one-how-many-people-die-from-extreme-temperatures-and-how-could-this-change-in-the-future>

³ Brett R. Scheffers et al., “The Broad Footprint of Climate Change from Genes to Biomes to People,” *Science* 354, no. 6313 (November 11, 2016): aaf7671, <https://doi.org/10.1126/science.aaf7671>.

⁴ Rachel H. Alinsky, Scott E. Hadland, J. Deanna Wilson, Pamela A. Matson, and Brendan Saloner, “Trends in Polysubstance Overdose Deaths Involving Opioids, Stimulants, and Benzodiazepines by Race and Ethnicity in the US, 2007-2021,” *JAMA Network Open* 7, no. 3 (March 2024): e238249, <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.8249>.

⁵ Lancet Commission on Climate and Health, “Health and Climate Change: Policy Responses to Protect Public Health,” *The Lancet* 386, no. 10006 (November 7, 2015): 1861–1914, [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)60854-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)60854-6).

⁶ Bob Henson, “Which Kills More People: Extreme Heat or Extreme Cold?” *Weather Underground*, January 22, 2019, <https://www.wunderground.com/cat6/Which-Kills-More-People-Extreme-Heat-or-Extreme-Cold>.

⁷ Tarik Benmarhnia et al., “Deaths Attributable to Heat and Cold: Comparison of Data Sources and Evaluation of Inconsistencies,” *GeoHealth* 8, no. 3 (March 2024): e2023GH000799, <https://doi.org/10.1029/2023GH000799>.

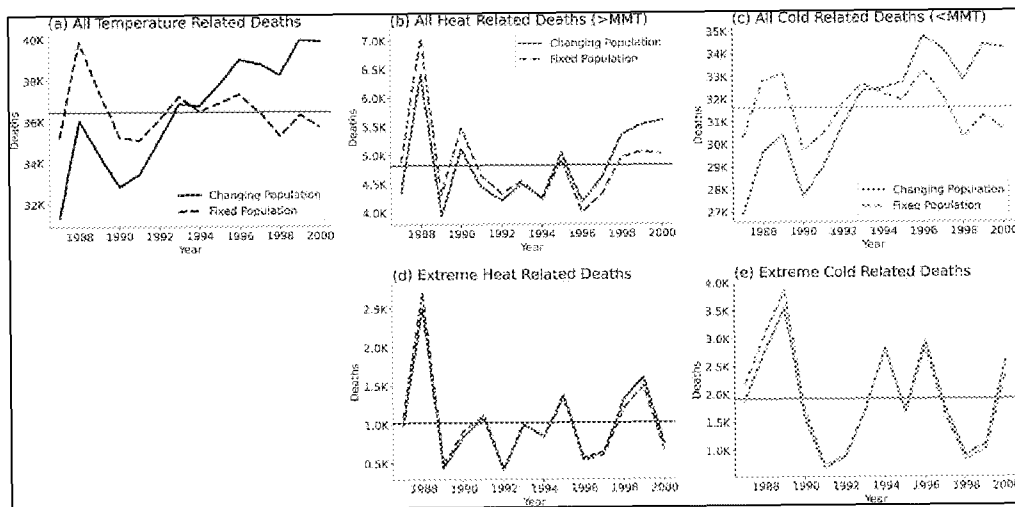


Figure 12.1: Time series of temperature-related deaths across all 106 cities. (a) The solid line represents total temperature-related deaths, while the dashed line indicates temperature-related deaths with a fixed population (average population from the 1987–2000 period). (b) Similar to (a), but for heat-related deaths. (c) Similar to (a), but for cold-related deaths. (d) Time series of deaths occurring in temperatures above the 97.5th percentile. (e) Similar to (d), but for temperatures below the 2.5th percentile. From <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2023GH000799>

The IPCC AR6 Working Group 2 Chapter 16.2.3.5 states how heat-related mortality is declining over time:⁸

“Heat-attributable mortality fractions have declined over time in most countries owing to general improvements in health care systems, increasing prevalence of residential air conditioning, and behavioral changes. These factors, which determine the susceptibility of the population to heat, have predominated over the influence of temperature change.”

A 2011 study of 40 major US cities between 1975 and 2004, found that heat wave mortality had decreased, in spite of rising temperatures, due to adaptation.⁹ Likewise Davis et al. (2003) examined heat-related mortality in 28 U.S. cities from the 1960s to the end of the 1990s and found that heat-related mortality declined by three-quarters over the sample period. Bobb et al. (2014) examined mortality data for 106 million people in over 100 cities U.S. cities and found a 60% decline in average heat-related mortality over the period 1987—2005, from 51 per thousand deaths to 19. They furthermore found that the greatest drop was among seniors over the age of 75. In a

⁸ B. O'Neill et al., “Key Risks Across Sectors and Regions,” in *Climate Change 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Geneva, CH: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021), 2411–2538.

⁹ Keith T. Ingram, Carolyn W. Furman, and John W. Jones, “Climate Change Impact and Adaptation Assessment: A Guide for Coastal Resources Managers,” *Weather, Climate, and Society* 3, no. 4 (October 2011): 234–249, <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-11-00055.1>.

study of 42 million deaths in 211 U.S. cities from 1962 to 2006. Nordio et al. (2015) found a more than 90 percent decline in the risk of mortality from excess heat.

In the context of large declines in heat-related mortality, by reducing mortality from cold events rising temperatures are associated with a net saving of lives.

It is both disappointing and telling to see how the IPCC misrepresents the situation in its AR6 Synthesis report. Section A.2.5 of that document states: “In all regions increases in extreme heat events have resulted in human mortality and morbidity (*very high confidence*).” But it is silent on the larger decline of deaths during extreme cold events.

12.2 The importance of adaptation

The observed decline in US heat-related mortality has been specifically attributed to adaptation. Wang et al. (2018) exploited the spatial variability of heatwave-related mortality across 209 U.S. cities from 1962 to 2006. While the raw data implies an increase in mortality risk during heatwaves, accounting for adaptation to heatwave intensity caused the effect to fall to near zero and become statistically insignificant. They used the results of their epidemiological model to project heat-related mortality out to 2050 under four RCP warming scenarios (including RCP8.5) with and without adaptive behavior. Assuming people continue to adapt to the heatwave risks in the regions in which they live Wang et al. project not only no increase in heat-related mortality but an overall decrease for the US as a whole. They conclude that “Ignoring adaptation would result in a substantial overestimate of future mortality related to heat waves... Accounting for adaptation, the overall heat-related mortality by 2050 would not change substantially over time compared to 2006.”

12.3 Mortality risks and energy costs

A 2016 study of US long term mortality risks associated with temperature variations (Barreca et al. 2016) showed that increases in mortality across the US are associated both with cold weather and hot weather. But over time, the introduction of electricity and the adoption of central heating and air conditioning (AC) dramatically reduced both risks, especially those associated with hot weather. Prior to 1960, a day above 90°F (32°C) added 2.2 percent to the average mortality risk rate, but after 1960 the same weather added only 0.3 percent to mortality risk, an 85 percent reduction. Prior to 1960 temperatures below 39°F (4°C) added about 1 percent to mortality risk but after 1960 the same weather only added about half that amount. Adaptation through conventional household improvements dramatically reduced public vulnerability to weather extremes. The entire reduction in hot weather mortality was attributable to widespread adoption of indoor AC, which depended on the availability of reliable and affordable electricity.

The corollary of this finding is that the use of heating and cooling systems depends on energy being affordable. Doremus et al. (2022) showed that wealthy and poor households in the US adjust

their energy expenditures at similar rates in response to moderate temperature swings, but not in response to extreme temperature swings. When temperatures swing to very cold levels ($< 5^{\circ}\text{C}$) energy spending in high-income households rises by 1.2 percent but in low-income households by only 0.5 percent. On very hot days ($>30^{\circ}\text{C}$) electricity spending in high-income households rises by 0.5 percent but does not change at all in low-income households. The latter result is observed even in subsamples where all households have AC. The implication is that even with widespread adoption of home heating and cooling systems, inability to afford energy leaves low-income households exposed to weather extremes.

Barreca, Alan, Karen Clay, Olivier Deschenes, Michael Greenstone, and Joseph S Shapiro, “Adapting to climate change: The remarkable decline in the US temperature mortality relationship over the twentieth century,” *Journal of Political Economy*, 2016, 124 (1), 105–159.

J.M. Doremus, I. Jacqz and S. Johnston (202), “Sweating the energy bill: Extreme weather, poor households, and the energy spending gap.” *Journal of Environmental Economics and Management*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2022.102609> .

Nordio, Francesco, Antonella Zanobetti, Elena Colicino, Itai Kloog and Joel Schwartz (2015). “Changing patterns of the temperature–mortality association by time and location in the US, and implications for climate change” *Environment International*, Volume 81, pp 80-86 <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.04.009>.

Wang, Yan, Francesco Nordio , John Nairn , Antonella Zanobetti and Joel D. Schwartz (2018) “Accounting for adaptation and intensity in projecting heat wave-related mortality” *Environmental Research* 161 pp. 464—471. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.049>

Bobb JF, Peng RD, Bell ML, Dominici F. (2014) Heat-related mortality and adaptation to heat in the United States. *Environmental Health Perspectives* 122:811–816; <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/ehp.1307392>

Davis, Robert E., Paul C. Knappenberger, Patrick J. Michaels and Wendy M. Novicoff (2003) “Changing Heat-Related Mortality in the United States” *Environmental Health Perspectives* 111(14) November 2003 pp. 1712—1718.

From: Roy Spencer <roywspencer@hotmail.com>
Sent: Sunday, June 8, 2025 8:28 AM
To: John Christy; Judith Curry
Cc: Steve Koonin; Ross McKittrick; Travis Fisher; Josh Loucks; seth.cohen@hq.doe.gov
Subject: How to respond to critics of our science....

Via Pielke Jr., nice that we have a blanket response already written to anyone who doesn't like our interpretation of the science (from NCA5 comments):



From: Judith Curry [curry.judith@gmail.com]
Sent: 6/6/2025 10:43:29 PM
To: John Christy [climateman60@gmail.com]
CC: Ross McKittrick [ross.mckittrick@gmail.com]; Travis Fisher [travis.scott.fisher@gmail.com]; Josh Loucks [loucksj14@gmail.com]; Roy W. Spencer [roywspencer@hotmail.com]; Steven Koonin [steven.koonin@gmail.com]
Subject: hurricanes
Attachments: NCA HR.docx

Draft of hurricane chapter attached, still need to do the damage stuff

On Fri, Jun 6, 2025 at 3:34 PM John Christy <climateman60@gmail.com> wrote:
Ross

This is how I felt when being lectured to by the head author of NCA5. You've raised something to consider, that in our professional opinions we find the NCA5 scientifically unprofessional in terms of failing to adhere to the congressional charge and using a tremendous amount of tax-payer funds to wander off into obvious advocacy for squishy social/policy issues.

Steve:

Ross's section four can replace my section on precipitation changes - but you may need the map.

John C.

On Fri, Jun 6, 2025 at 5:06 PM Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com> wrote:

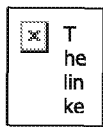
Since John caught up to me and now has 3 examples, I've put a 4th forward in the attached. My criticisms are under 4 headings:

1. Pervasive advocacy language and promotional tone
2. Uncritical definition of scientific "advances"
3. Overstating what underlying sources show
4. Sweeping generalizations regarding complex matters

For #4 I go into some detail on the precip record that John has assembled. I consider this especially fair game since it elaborates on a point I emphasized in my review comments to them (referencing our paper), which they obviously ignored. There are + trends in average and extreme precipitation if you start the sample in 1950. But start it prior to 1890 or in 1980 and the trends largely go away. And they are regionally very heterogeneous. Glib attribution claims founder on the regional and temporal heterogeneity.

I've also attached a proposed edit to the report outline. Although we want to tread carefully in passing judgment I think it is important to emphasize that the NCA5 needs to be held to a very high standard because everyone involved knows the stakes of the policy decisions that will rest on it. Honest mistakes are one thing, but pervasive bias and frivolous handling of complex topics is simply unacceptable. I hadn't looked at it since it came out and I come away from ch's 1-3 feeling like they are insulting the intelligence of readers, and the presentation is so careless and tendentious we are justified in saying you can't trust its conclusions.

--



Judith Curry, President
CFAN - Climate Forecast Applications Network
Reno, NV USA
curry.judith@cfanclimate.com | +1.404.803.2012
<http://www.cfanclimate.net>

HURRICANES

NCA5 Key message 2.2: “Hurricanes have been intensifying more rapidly since the 1980s (high confidence) and causing heavier rainfall and higher storm surges (high confidence).”

The justification for the *high confidence* conclusion on more rapid intensification of hurricanes is based on two citations. Kishtawal et al. (2012) examined data over the period 1986-2010 and Bhatia et al. (2019) considered satellite data on global hurricanes over a short period from 1982 to 2009 – short periods that are confounded by natural variability.

No justification for the *high confidence* conclusion on higher storm surges is provided in Chapter 2. The Knutson et al. (2019) assessment cited in Chapter 2 in a different context includes the following statement: “there is only low confidence for detection or attribution of an anthropogenic influence on the surge events.”

No justification is provided for the *high confidence* conclusion regarding hurricanes causing heavier precipitation. The Knutson et al. (2019) assessment cited in Chapter 2 in a different context includes the following statement: “However, no observational studies have provided convincing evidence of a detectable anthropogenic influence specifically on hurricane-related precipitation.”

In the Traceable Accounts section, Description of Confidence and Likelihood: “Basic physical understanding and climate models both provide robust explanations for the links between climate change and observed changes in these extremes: this is why the authors also have high confidence that storms are delivering more rainfall and high confidence that storm surges are becoming higher.”

In short, the NCA5 provides no observational basis for their high confidence assertions that hurricanes are causing heavier rainfall and higher storm surges; instead they rely on basic physical understanding and climate model simulations. The high confidence assertion regarding increasing rates of intensification is based on two papers with relatively short data records that are confounded by natural variability.

HURRICANE DAMAGE STUFF FORTHCOMING NOTES BELOW

hurricane damage in the United States has generally increased since 1900.¹⁵⁹
Changes in smaller-scale, short-lived severe weather

There has been a 17% decrease in the speed of movement of storms in the North Atlantic basin since 1900,¹⁵⁷ as well as an increased tendency for storms along the North American coast to meander and stall since the 1950s.¹⁵⁸

There is no long-term trend in the frequency of landfalling hurricanes in the United States since the late 19th century, but there has been an increase in basin-wide hurricane activity in the North Atlantic since the early 1970s.

152 153

, In addition to recent increases in storm frequency, evidence continues to build that hurricanes are changing in other dangerous ways. Tropical cyclones have been intensifying more rapidly

since the early 1980s,

154 155

, leaving communities with less time to prepare. Hurricanes tend to lose energy as they move away from the ocean, but the rate of this hurricane decay has slowed since the 1960s, allowing storms to extend somewhat farther inland.¹⁵⁶ There has been a 17% decrease in the speed of movement of storms in the North Atlantic basin since 1900,¹⁵⁷ as well an increased tendency for storms along the North American coast to meander and stall since the 1950s.¹⁵⁸ Slower-moving storms can result in more heavy rainfall, wind damage, storm surge, and coastal flooding; notably, after accounting for changes in the value of property and other assets placed in harm's way, hurricane damage in the United States has generally increased since 1900.¹⁵⁹

Knutson, T., S.J. Camargo, J.C.L. Chan, K. Emanuel, C.-H. Ho, J. Kossin, M. Mohapatra, M. Satoh, M. Sugi, K. Walsh, and L. Wu, 2019 : Tropical cyclones and climate change assessment: Part I: Detection and attribution. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100 (10) , 1987-2007. <https://doi.org/10.1175/ams-d-18-0189.1>

153. Vecchi, G.A., C. Landsea, W. Zhang, G. Villarini, and T. Knutson, 2021 : Changes in Atlantic major hurricane frequency since the late-19th century. *Nature Communications*, 12 (1), 4054. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24268-5>

154. Bhatia, K.T., G.A. Vecchi, T.R. Knutson, H. Murakami, J. Kossin, K.W. Dixon, and C.E. Whitlock, 2019: Recent increases in tropical cyclone intensification rates. *Nature Communications*, 10 (1) , 635. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08471-z>

155. Kishtawal, C.M., N. Jaiswal, R. Singh, and D. Niyogi, 2012: Tropical cyclone intensification trends during satellite era (1986-2010). *Geophysical Research Letters*, 39 (10). <https://doi.org/10.1029/2012gl051700>

156. Li, L. and P. Chakraborty, 2020: Slower decay of landfalling hurricanes in a warming world. *Nature*, 587 (7833) , 230-234. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2867-7>

157. Kossin, J.P., 2019 : Reply to: Moon, I.-J. et al. ; Lanzante, J. R. *Nature*, 570 (7759), E16-E22. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1224-1>

158. Hall, T.M. and J.P. Kossin, 2019: Hurricane stalling along the North American coast and implications for rainfall. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2 (1) , 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0074-8>

159. Grinsted, A., P. Ditlevsen, and J.H. Christensen, 2019 : Normalized US hurricane damage estimates using area of total destruction, 1900-2018. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 116 (48), 23942-23946.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1912277116>

https://rogerpielkejr.substack.com/p/apples-oranges-and-normalized-hurricane?utm_source=publication-search

<https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/64/4/JAMC-D-24-0222.1.xml>

In summary, from a Type I error avoidance perspective, a slight majority of the authors (6 of 11) 631 had only low confidence that there has been a detectable decrease in global or western North 632 Pacific TC translation speeds since 1949. For the other five authors, four had low-to-medium 633 confidence, and one had medium confidence). Most authors (eight of 11) concluded that there 634 was only low confidence that anthropogenic forcing had contributed to the observed decrease. 635 Alternatively, from the perspective of reducing Type II errors, most authors (eight of 11) 636 concluded that the balance of evidence suggests there has been a detectable decrease in global

TC translation speeds since 1949; only one author concluded that the balance of evidence 638 suggests that anthropogenic forcing has contributed to the observed decrease.

,

From: Roy Spencer <roywspencer@hotmail.com>
Sent: Friday, April 18, 2025 7:40 AM
To: Ross McKittrick; Travis Fisher
Cc: Steven Koonin; John Christy
Subject: I'll need help: 10 sections to go

All:

I don't see how I'm going to do the 10 more sections assigned to me (1.6.1 onward) in the time remaining. Feel free to jump in.

-Roy

From: Roy Spencer <roywspencer@hotmail.com>
Sent: Friday, April 18, 2025 6:34 AM
To: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>; Travis Fisher <travis.scott.fisher@gmail.com>
Cc: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>; John Christy <climateman60@gmail.com>
Subject: Section 1.4.3 attached

Ross:

I think we should combine sections 1.4.3 and 1.4.4 (attached) which I now call "The carbon cycle, emissions scenarios, and global greening".

I found that all of these need to be discussed together. Feel free to reword the section title.

-Roy

From: Roy Spencer <roywspencer@hotmail.com>
Sent: Thursday, April 17, 2025 6:17 AM
To: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>; Travis Fisher <travis.scott.fisher@gmail.com>
Cc: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>; John Christy <climateman60@gmail.com>
Subject: Section 1.4.2 Can climate models reproduce the recent past?

Attached. This is the minimum I think needs to be in this section. Of course, more could be added, but I think we need to stick to our strongest arguments, given the limited time available.

-Roy

From: Roy Spencer <roywspencer@hotmail.com>
Sent: Wednesday, April 16, 2025 7:16 AM
To: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>; Travis Fisher <travis.scott.fisher@gmail.com>
Cc: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>; John Christy <climateman60@gmail.com>
Subject: Some Spencer inputs

I took it upon myself to write a preamble in **Section 1.3 Drivers of climate change** (attached), which seemed necessary to introduce some basic concepts.

Also attached are my initial submissions for **1.3.2** and **1.3.3**.

NO references added yet.

One of the things I believe we need to watch out for is *neglecting to come to conclusions along the way*... There is a tendency to get mired in the technical details without getting around to saying what each section might mean in eventual policy decisions related to the Endangerment Finding. In my experience, it is not possible to dumb-down this stuff too much. I suggest some sort of "Summary Boxes" with 1-2 simplified statements highlighting a main conclusion of each section that would have policy relevance.

-Roy

From: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>
Sent: Monday, April 14, 2025 1:37 PM
To: Travis Fisher <travis.scott.fisher@gmail.com>
Cc: Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com>; John Christy <climateman60@gmail.com>; roywspencer@hotmail.com <roywspencer@hotmail.com>
Subject: Re: Kickoff

Hi Travis

We developed the outline a bit further and assigned sections out yesterday. We'll keep you cc'd going forward.

Here is a Dropbox link that contains the current outline (also attached) which indicates who is working on each section

https://www.dropbox.com/scl/fo/wahx6lpwzu33m5vyrr8x/ANTU1qAQJ-zXCFzP_gsJcOs?rlkey=11z3qj9v46e1t5f4ywwxq7p8c&dl=0

The link should give you all editing privileges.

I put folders in there for each of us. If the use of that Dropbox (which is on my own account) is acceptable for this project then we can share our work using it. Otherwise once we have an official Dropbox created we can transfer the material over to it.

Do you think it would be helpful to have a section specifically addressing the question of whether CO2 is a pollutant like CO, NOx, SOx, PM, etc.? If you want to add topics or suggest changes please do, the earlier the better as we begin filling out the contents.

Cheers,
Ross

On Mon, Apr 14, 2025 at 2:12 PM Travis Fisher <travis.scott.fisher@gmail.com> wrote:

This is an excellent start! Can we move forward by iterating with this document for now? Please feel free to add whatever material you like, and I can collate if there are any simultaneous changes. I will leave the substance to you all because I view my role as a facilitator rather than a contributor, but please let me know how I can be most helpful.

Steve is correct that this document should be clear and understandable for non-experts. My understanding is that it should also be sufficiently technical and comprehensive to inform policymakers on all relevant aspects of the science.

One area I can help with might be targeting your work for the very brief window we have open at the moment. I am including a few lines verbatim below from key documents to highlight the areas of inquiry that are most relevant to the policymaking process. Of course, you all should make your own judgments about what to include versus what to leave out.

Here is a key section of the Clean Air Act, 202(a)(1): "The Administrator shall by regulation prescribe (and from time to time revise) in accordance with the provisions of this section, standards applicable to the emission of any air pollutant from any class or classes of new motor vehicles or new motor vehicle engines, which in his judgment cause, or contribute to, air pollution which may reasonably be anticipated to endanger public health or welfare. Such standards shall be applicable to such vehicles and engines for their useful life (as determined under subsection (d), relating to useful life of vehicles for purposes of certification), whether such vehicles and engines are designed as complete systems or incorporate devices to prevent or control such pollution."

Section 202 can be found [here](#).

Here is another key section of the Clean Air Act, section 302(g): "The term 'air pollutant' means any air pollution agent or combination of such agents, including any physical, chemical, biological, radioactive (including source material, special nuclear material, and byproduct material) substance or matter which is emitted into or otherwise enters the ambient air. Such term includes any precursors to the formation of any air pollutant, to the extent the Administrator has identified such precursor or precursors for the particular purpose for which the term 'air pollutant' is used."

A threshold question raised in Justice Scalia's dissent in *Mass v. EPA* (which can be found [here](#)) is whether CO2 falls under the definition of an "air pollutant" under the Clean Air Act. The majority in *Mass v. EPA* found that *any* compound emitted into the ambient air fits the definition of "air pollutant," leading to a colorful footnote in the Scalia dissent ("It follows that everything airborne, from Frisbees to flatulence, qualifies as an 'air pollutant.' This reading of the statute defies common sense."). A scientific interpretation of this definition could be very helpful.

The next section in the statute is 302(h), which defines effects on welfare: "All language referring to effects on welfare includes, but is not limited to, effects on soils, water, crops, vegetation, manmade materials, animals, wildlife, weather, visibility, and climate, damage to and deterioration of property, and hazards to transportation, as well as effects on economic values and on personal comfort and well-being, whether caused by transformation, conversion, or combination with other air pollutants." Positive impacts, including fertilization effects and beneficial warming, seem to be within scope here.

Section 302 can be found [here](#).

As you all develop the draft, I encourage you to include as many citations to published materials as possible (links would work fine as placeholders). I have found this works better under a tight timeline than going back and looking for sources later. Please also feel free to task me with any research help you might need.

Best,
Travis

On Fri, Apr 11, 2025 at 8:10 PM Steven Koonin <steven.koonin@gmail.com> wrote:

I assume we're writing for non-experts. If so, some educating beyond the root questions is in order (it always helps if people feel smarter after reading).

So I've taken Ross' material, added some broader context, and cast it into the forcing/response/impact syllogism that most non-experts seem to get. The result is attached.

I think we can deal with the differences relative to 2009 in an appendix.

SEK

From: John Christy <climateman60@gmail.com>

Sent: Friday, April 11, 2025 6:34 PM

To: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>

Cc: Travis Fisher <travis.scott.fisher@gmail.com>; steven.koonin@gmail.com; roywspencer@hotmail.com

Subject: Re: Kickoff

Excellent list Ross. Wildfires are a significant topic to be addressed.

John C.

Sent from my iPhone

On Apr 11, 2025, at 4:05 PM, Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com> wrote:

The attached represents my summary of the most questions needing to be answered, which I think this group is capable of answering in the next couple of weeks. Probably lots of material already in hand.

On Fri, Apr 11, 2025 at 4:24 PM Travis Fisher <travis.scott.fisher@gmail.com> wrote:

Gentlemen,

I can't thank you enough for taking this on under such a tight timeline. Let's use this thread to exchange information, links, etc., and as we move forward, I'll see about a document-sharing platform and a shared document to work on simultaneously.

Best,
Travis

<DE.memo.outline.Apr.11.[RM].docx>

From: Ross McKittrick [ross.mckittrick@gmail.com]
Sent: 8/5/2025 8:51:52 PM
To: Roy W. Spencer [roywspencer@hotmail.com]; Judith Curry [curry.judith@gmail.com]; John Christy [climatemanager60@gmail.com]; Steven Koonin [steven.koonin@gmail.com]; Josh Loucks [loucksj14@gmail.com]
Subject: Internal DoE responses compiled into 1 file
Attachments: Internal.DoE.Review.incl.Responses.docx

just as Judy was sending her email I was about to hit send on this one. The attached Word document compiles all the responses into 1 file. It reflects my edits, Steve's edits and John's edits. Judy did you add any other changes?

Pg	Par a	Comment or Suggested Edit	
viii	2	The greening effect can't be due to increase in CO2 alone. The fertilization effect needs Nitrogen and phosphorous. There is observational[1] evidence that nitrogen available to plants is decreasing with increasing CO2 and thus acting to limit fertilization effect. Secondly, the greening of some portions of the planet are likely due to changes in precipitation patterns associated with changing climatic conditions and not entirely attributable to fertilization effect. We will also need to consider that the temperature effect on photosynthesis will also be a limiting mechanism to any continued greening dur to fertilization in the future [2]. I recommend acknowledging that the greening is not attributable to CO2 alone and continued greening in the future with increasing CO2 is uncertain. Changed sentence to “Elevated concentrations of CO₂ directly enhance plant growth, globally contributing to “greening” the planet”	[1] Rachel E. Mason et al. Evidence, causes, and consequences of declining nitrogen availability in terrestrial ecosystems. Science376, eabh3767(2022).DOI:10.1126/science.abh3767 [2] C.E. Moore, et lathe effect of increasing temperature on crop photosynthesis: from enzymes to ecosystems. Exp. Bot., 72 (8) (2021), pp. 2822-2844
viii	3	I am glad we acknowledge that CO2 causes warming, though I am not sure why we are not considering other energy sector related emissions that also cause warming (CFCs/HCFCs, methane, aerosol effects). It is not clear what is meant by "CO2 emissions have tended to overestimate observed trends". This is not correct, the cumulative emissions track the RCP8.5 scenario the closest [3,4]. While there was a decrease in emissions during the Covid-19 period the emissions are now back on track following RCP8.5. This statement should clarify what is meant by the statement in the text. Rewrote sentence in the summary section to read “Climate change simulations require scenarios of distant future emissions. There is evidence that scenarios widely-used in the impacts literature have overstated observed and likely future emission trends.” On page 16 text added “Schwalm et al. (2020) defended the use of RCP8.5 on the grounds that cumulative CO2 emissions over 2005-2020 track it more closely than the lower RCP scenarios. They also argue that a modified version of the IEA scenarios closely track RCP8.5 in the coming decades. Hausfather and Peters (2020b) responded that the skill of RCP8.5 over those 15 years is due to offsetting errors in its representation of CO2 from fuel use and land use change, and the apparent agreement with IEA in coming decades is due to Schwalm et al. adding in very high land use emissions. The IEA’s own projected CO2 emissions track well below RCP8.5.”	[3]C.R. Schwalm, S. Glendon,& P.B. Duffy, RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 117 (33) 19656-19657, https://doi.org/10.1073/pnas.2007117117 (2020). [4] C.R. Schwalm, S. Glendon, & P.B. Duffy, Reply to Hausfather and Peters: RCP8.5 is neither problematic nor misleading, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 117 (45) 27793-27794, https://doi.org/10.1073/pnas.2018008117 (2020).

viii	4	This paragraph seems to be talking about equilibrium climate sensitivity. The most recent model inter-comparison gives a wider range of climate sensitivities in the range of 1.8 to 5.7 and is wider than estimates of climate sensitivities that have been estimated from paleoclimatic and more recent historical datasets, in the range could be in the range of 2.3 to 4.5 K[5]. The higher sensitivity in the most recent model assessments are an area of active investigation by modelers, the feasibility of a higher range needs to be confirmed with additional observational and process scale modeling [6]. The range for climate sensitivities, 1.8-2.7, should be corrected to the most recent findings, 2.3-4.5. We should also recognize that the (a)earth is a complex system of systems (b)we can't do an experiment to find out what is correct or reduced the uncertainty. As we get better at extracting temperature records and CO2 concentrations from paelo data, there will be better reconstructions and possibly narrower range along with improvements in modeling that resolve many physical, biological and chemical processes as we get to higher and cloud resolving spatial resolutions. We discuss Sherwood et al. in Ch 4. Sentence changed: “Data-driven methods yield a lower and narrower range.”	[5] Sherwood, S. C., Webb, M. J., Annan, J. D., Armour, K. C., Forster, P. M., Hargreaves, J. C., et al. (2020). <u>An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence</u>. <i>Reviews of Geophysics</i>, 58, e2019RG000678. https://doi.org/10.1029/2019RG000678 [6] Zelinka, M. D., Myers, T. A., McCoy, D. T., Po-Chedley, S., Caldwell, P. M., Ceppi, P., et al. (2020). <u>Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models</u>. <i>Geophysical Research Letters</i>, 47, e2019GL085782. https://doi.org/10.1029/2019GL085782
viii	5	This is again not true for the majority of the models in the AR6. Figure 7.19 in the IPCC AR6 report shows that majority of the models exhibit a range within the observational range. The models running hot in the most recent decades are the ones with climate sensitivities grate than 5K, which are 3 out of a total of 40 and it should be noted that about the same number of models also are running cold' compared to observed[7] Paragraph has been rewritten: The world’s several dozen global climate models offer little guidance on how much the climate responds to elevated CO2, with the average surface warming under a doubling of the CO2 concentration ranging from 1.8°C to 5.7°C [Section 4.2]. Data-driven methods yield a lower and narrower range [Section 4.3]. Global climate models generally run “hot” in their description of the climate of the past few decades– too much warming at the surface and too much amplification of warming in the lower- and mid- troposphere [Sections 5.2-5.4]. The combination of overly sensitive models and implausible extreme scenarios for future emissions yields exaggerated projections of future warming.	[7]Hausfather, Z., Drake, H. F., Abbott, T., & Schmidt, G. A. (2020). Evaluating the performance of past climate model projections. <i>Geophysical Research Letters</i>, 47, e2019GL085378. https://doi.org/10.1029/2019GL085378
viii	5,6,7	There is very little dispute that these are challenging issues for climate science. Many of the issues identified here related to compound effects (subsidence and se-level rise; wildfire and forest management) that requires further scientific investigation. Identifying further research avenues/focus areas will be helpful to firm up some of the challenges faced in using the climate projections as discussed in the paragraph 9. There is no disagreement here.	

viii	9	The focus on uncertainty is relevant and should be emphasized in future research. However, as a reasonable policy pathways, making decisions in the face of these uncertainties is critical. Most of the climate uncertainties that we have confidence at this time can be considered Level 2 and Level 3 uncertainties, approaches such as scenario analysis (and others) are suggested and followed for making hazard and risk estimates for future conditions. For deep uncertainty hazards (for example tornadoes etc.) that we don't have enough data or capability to model, developing methods for assessing the uncertainty and risk should be a focus of future research. There is no disagreement here. See Curry's book Climate Uncertainty and Risk.	
2	3	The reason CO2 was identified as a pollutant is the health consequences of increased temperature, flooding and other climate impacts and not because of any direct affect on health dur to exposure to atmospheric CO2[8]. There is no disagreement here.	[8] https://www.cdc.gov/climate-health/php/effects/index.html
3	1/C hap ter su m ma ry	The summary should note that CO2 fertilization effects are limited by the availability of other critical plant nutrients (Nitrogen, Phosphorous). The fertilization effect is also constrained by higher temperature effecting photosynthesis[9] Added sentence: Other contributing factors included warming and increased nitrogen.	[9] Xinyuan Wei et al 2025 Environ. Res. Lett. 20 064013
3	3	The attribution of greening to primarily CO2 fertilization is questionable as per recent research. Specifically, in the Northern high latitudes (where the greening is most prominent), increases in temperatures due to climate change has been shown to provide the best explanation[10]. In the sub-Saharan region reforestation efforts and changing precipitation patterns lead to some of the observed greening (the great green wall) [11]. The attribution to CO2 fertilization should be qualified by noting the other present and emerging constraints. We cite Zhu et al attributing 70% of change to CO₂ . That implies other factors matter as well.	[10]Liu, J., Wennberg, P.O. An emergent constraint on the thermal sensitivity of photosynthesis and greenness in the high latitude northern forests. Sci Rep 14, 6189 (2024). https://doi.org/10.1038/s41598-024-56362-1 [11] Francesco S.R. Pausata, Marco Gaetani, Gabriele Missouri, Alexis Berg, Danielle Maia de Souza, Rowan F. Sage, Peter B. deMenocal, The Greening of the Sahara: Past Changes and Future Implications, One Earth, Volume 2, Issue 3, 2020, Pages 235-250, ISSN 2590-3322, https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.03.002.
3	5	This summarization ignores the compound effects of temperature, moisture and CO2 fertilization in assessing the impacts of CO2 increase on vegetation and crop yields. Many studies have shown that [12]. Making note of these compensating factors is required for a balanced view on CO2 fertilization effects on plants. This issue is addressed in Chapter 9	[12]Lesk, C., Anderson, W., Rigden, A. et al. Compound heat and moisture extreme impacts on global crop yields under climate change. Nat Rev Earth Environ 3, 872–889 (2022). https://doi.org/10.1038/s43017-022-00368-8

4	1	Chen et al. (2024)[13] conclude that "In the attribution analysis of LAI trend and growth rate trend, there were some differences between multiple linear regression model and partial correlation analysis at high latitudes in the northern hemisphere. Partial correlation analysis showed that LAI trend and growth rate trend in this region were mainly affected by temperature and radiation, while multiple linear regression suggested that CO2 was the dominant driver. The results of the partial correlation analysis seem more reasonable because some previous studies have shown that vegetation change in the high latitudes of the northern Hemisphere is mainly positively affected by climate warming. Multiple linear regression model performed relatively poorly in this region and might not fully identify the contribution of individual drivers. In addition, our model does not include the contribution of land management, which has been highlighted in some previous studies. Of course, the contribution of land management to LAI trend and growth rate trend may be implied in other drivers, such as the positive contribution of CO2 to LAI trend in PP and PN areas". We have added the Chen references. Our existing summary doesn't conflict with this. They conclude CO2 is the dominant driver globally but not the only driver.	[13]Xin Chen, Tiexi Chen, Bin He, Shuci Liu, Shengjie Zhou, Tingting Shi, The global greening continues despite increased drought stress since 2000, Global Ecology and Conservation, Volume 49, 2024, e02791,ISSN 2351-9894,
6	1	This again suffers from not acknowledging the effects of compound and often compensating phenomena that is occurring with the on-going climate change. For example [14] note that much of the Midwest any benefit from CO2 fertilization will be negated by temperature increases. [15] note that "Our results show that long-term physiological acclimation dampens the initial stimulation of plant net carbon assimilation to elevated [CO2], and of plant water use to warming." The topic of agricultural productivity is addressed in Chapter 9 It is not disputed that effects of dT go negative at high enough levels. The 2013 paper by Ruiz-Vera et al doesn't provide much general information beyond the FACE experiment site. The C14 data set is a global sample and takes both dT and dC into account.	[14]Ursula M. Ruiz-Vera, Matthew Siebers, Sharon B. Gray, David W. Drag, David M. Rosenthal, Bruce A. Kimball, Donald R. Ort, Carl J. Bernacchi, Global Warming Can Negate the Expected CO2 Stimulation in Photosynthesis and Productivity for Soybean Grown in the Midwestern United States , Plant Physiology, Volume 162, Issue 1, May 2013, Pages 410–423, https://doi.org/10.1104/pp.112.211938 [15] Lamba S, Hall M, Rantfors M, et al. Physiological acclimation dampens initial effects of elevated temperature and atmospheric CO2 concentration in mature boreal Norway spruce. Plant Cell Environ. 2018; 41: 300–313. https://doi.org/10.1111/pce.13079
8	1	The fallacy of these arguments in terms of PH changes and evolution is that the changes described in this paragraph occurred over millennia and the evolutionary process had time to adapt; here with climate change we are talking about changes in our lifetime, the speed of change is the issue. This will lead to collapse of some ecosystem and by the time adaptation takes place it will be millions of years and in a different climate - not the one we have now and that enabled the rise of humans. The chapter notes large regional and even diurnal variations in ocean pH. We already address the issue of short timescale variations on p. 8: "On the time scale of thousands of years, boron isotope proxy measurements show that ocean pH was around 7.4 or 7.5 during the last glaciation (up to about 20,000 years ago) increasing to present-day values as the world warmed during deglaciation (Rae <i>et al.</i>, 2018). Thus, ocean biota appear to be resilient to natural long-term changes in ocean pH since marine organisms were exposed to wide ranges in pH."	
5	Fig 2.2	A simple calculation will show us how misleading this figure is. It shows that over 600 Million years CO2 changed by around 6000ppm. That is a rate of change of 0.00001/yr; COE changed from 275 to 430 in the past 175 years, that is rate of change of 0.88ppm/yr. A change in the rate of over 10^5 in magnitude - there in lies the problem. We are seeing a rapid increase in CO2 that has never been witnessed and the ecosystem and huma society (which is at best 10K years old), may not be able to adapt to this rapid change. This figure has been deleted. We don't know what the rate of changes was on an annual or centennial time scale since the data are too low resolution. We have added the following sentence:	

		“While the modern rate of change in CO2 is likely high compared to prior intervals, the geological evidence is that plants and animals evolved under much higher CO2 levels than at present.”	
12	Summary	The misuse of RCP8.5 as business as usual is acknowledged. However, this was never intended to be a no-policy or business as usual scenario but as a high-end baseline scenario. When dealing with interaction of physical systems with socio-economic projections (which tend to be highly uncertain and policy dependent), the development of this high baseline scenarios is intended to explore the uncertainty ranges that represent a high-end scenario[16,17]. As any engineer would acknowledge, this is a prudent approach when dealing with L3 and L4 type deep uncertainties and provide valid envelopes for assessing uncertainties and risks from high impact events/hazards. The rest of the statements here are uncertainties acknowledged by the climate scientists and included in developing projections and discussing the results[4]. Does the IPCC downplay the role of sun in climate change? The IPCC includes sun variability in all its assessments from the beginning and has been acknowledged as a potential but insignificant contributor. The comments do not imply any disagreement with what we have written. Extreme scenarios for models are useful for bracketing outcomes but our criticism (based on the literature) is the widespread use of RCP as a no-policy baseline; the reviewer acknowledges that was never its purpose. The IPCC’s assessment insignificance of the sun in climate change is based in part on use of low variability irradiance reconstructions that rule out it having any role. This is addressed in Chapter 8	[16]van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M. et al. The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change 109, 5 (2011). https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z [17]Hausfather, Z. (2025). An assessment of current policy scenarios over the 21st century and the reduced plausibility of high-emissions pathways. Dialogues on Climate Change, 2(1), 26-32. https://doi.org/10.1177/29768659241304854 (Original work published 2025)
16	2,3,4,5	Please see above. The business-as-usual may be a misnomer but this is an 95% case that is typically included in any type of prudent uncertainty analysis, in particular given the difficulty of predicting the evolution of socio-economic and political conditions over the next 100 years. It should be noted the difference between RCP8.5 and RCP4.5 for mid-century conditions that is of particular focus for adaptation studies in not significant and most of the divergence in these two scenarios occurs later in the century. Implausibility is not equivalent to very unlikely (e.g. 95th percentile), but rather includes impossible or implausible assumptions. High impact hazards occur independent of atmospheric CO2 concentrations (Chapter 6).	

19	5	That the dynamic vegetation models need more development is acknowledged and is a defining challenge for Earth System Modeling for the next decade. There is no disagreement here	
22	3	As noted, Parker[18,19,20] has investigated the Urban effects on temperature records. The finding establish that by comparing warm and wind conditions world wide that the impact is negligible. However, as noted by authors, this literature hasn't progressed much over the last decade and much more attention needs to be paid to this question by employing newer models, datasets and analytical techniques available to us at present. The CWG Report addresses this concern. We agree with the reviewer that the literature stalled a decade+ ago.	[18] Parker, D. Large-scale warming is not urban. Nature 432, 290 (2004). https://doi.org/10.1038/432290a [19]Parker, D.E. (2010), Urban heat island effects on estimates of observed climate change. WIREs Clim Change, 1: 123-133. https://doi.org/10.1002/wcc.21. [20]Parker, D. E., 2006: A Demonstration That Large-Scale Warming Is Not Urban. J. Climate, 19, 2882–2895, https://doi.org/10.1175/JCLI3730.1.
28	2	We can all agree that there is a desperate need for developing higher-resolution climate models that can get to cloud resolving scale so that we can represent the cloud feedbacks correctly in the model and avoid uncertainties from parameterization and scale dependency of the parameters. This doesn't make these models useless. The models provide directions for further improvements and necessary changes to reduce the uncertainty bands over the ECS. The climate models are useful for research purposes. The CWG Report demonstrates that they are not fit for the purpose of policy making. There's no guarantee increased resolution will be the answer, but if ever a model appears that can deal correctly with clouds that will be quite something.	

29	2	The databased approaches have mostly been robust with changes at the high end around 3-4C and at the low end around 1.8 to 2.5C as noted in the chapter. It will be challenging to make this range shorter given the data requirements and uncertainties in data over paleo/haloacene periods. It seems reasonable to estimate that we may have ECS in the range of 3 to 4K (higher than 3.5K being less likely [21]) at the higher end and this should not prevent us from planning and thinking on ways to prevent this possible scenario as it could have major consequences for humans across the planet. The Report acknowledges that 4C is a reasonable upper bound for the likely range	[21] Michael Mann, Our Fragile Moment: How lessons from Earth's past can help us survive climate crisis, Hachette Group Inc., 2024.
32	3	The models range over a factor of three in ECS comparing the most sensitive to the least sensitive models. However vast majority of the models are in 3 to 3.5K sensitivity range and it is probably not correct to assign all models the same amount of importance, given the fact that some of institutes participating in the exercise have different levels of capacity to develop and test models. Only 5 of the models are between 3 and 3.5C Some of the most reputable models have the highest values of ECS, including UK and US models The point made in this paragraph is that research over several decades has not reduced the range of model ECS. For observers who rely on model outputs this is very concerning and again goes to the question of fitness for purpose, as posed in the prior paragraph.	
34	1	While this analysis for the CMIP6 model set is accurate and focuses on a dataset that has shown higher ECS than previous iterations. it should be noted the models have exhibited considerable skill in predicting the subsequent GMST warming[22]. The criticism of the CMIP6 based high ECS models may be premature and probably will have to wait additional time before passing judgement. As noted in [22] these models have shown considerable skill when evaluated on their projections over the past 30-40 years after the projections were published. Figure 5.3 in the Report clearly refutes this assertion Hausfather et al. did examine early model-obs matches but only using models that had relatively low ECS. The Scaffeta analysis covered a longer interval (1980-2021) than the Hausfather et al. analysis of SAR (1995-2017) and TAR (2001-2017). Its findings line up with Fig 5.3 and the tropospheric evidence in Fig 5.4.	[22]Hausfather, Z., Drake, H. F., Abbott, T., & Schmidt, G. A. (2020). Evaluating the performance of past climate model projections. Geophysical Research Letters, 47, e2019GL085378. https://doi.org/10.1029/2019GL085378
36	1	A recent study attributes the bias to inter-annual availability and residual bias in the satellite record. The pre- and post 2000 have temperature records from two separate satellites and the discrepancy in the trends needs to be resolved[23] Chung et al. (using output through 2014 only) confirm the models' too-high warming rates and suggested two issues that might contribute to at least part of the discrepancy: (1) the differential phasing of natural, ephemeral events such as El Niños between models and observations and (2) a possible spurious cooling in UAH and NOAA/STAR satellite datasets around 2000. Regarding (1) we agree that the timing of major events like ENSOs diminishes the fidelity of models-to-observations comparisons for short periods, but now with 46 years of record as well as two major El Niño warm events since 2014 in the observations, the results shown in Fig. 5.7 are quite appropriate for comparison. Regarding (2) Christy et al. 2018 (and later Zou et al 2023) specifically examined the divergence around 2000 between UAH and NOAA/STAR vs. RSS and UW demonstrating that RSS and UW's use of the aging and drifting NOAA-14 satellite relative to the new, highly calibrated NOAA-15 sensor contributed to a spurious warming in RSS and UW. Be that as it may, CWG Fig. 5.7 is clear in noting all models overestimate the tropical temperature trend relative to observations – model trends being even more positive than those of RSS and the two Reanlayses (in addition to UAH and NOAA/STAR).	[23]Chung, ES., Kim, SJ., Sohn, BJ. et al. Multi-decadal climate variability and satellite biases have amplified model-observation discrepancies in tropical troposphere warming estimates. Commun Earth Environ 5, 342 (2024). https://doi.org/10.1038/s43247-024-01510-8

38	3	This is challenge we need to face and work on improving the parametrizations. The new era of super high resolution models would resolve the complex interactions of turbulence, transport and clouds and will provide less uncertainty[24]. However, this can't be used to invalidate the entire set of models, the models are performing remarkably well given the complex system that is being modeled. It should be noted the models do cover the range of the observations and it is not outside the envelope of model predictions. The Report does not address invalidating the entire set of models. Rather we address the fitness-for-purpose of the models for policy making. Fig 5.6 shows that to the extent there is a match with observations, it comes from models with very little CO2 response. “However, this can't be used to invalidate the entire set of models, the models are performing remarkably well given the complex system that is being modeled.” This statement is not supported by the evidence unless and until “remarkably well” is metricized for us to examine and make a determination. The paper cited doesn’t exactly apply to the real world (looking at Fig 1 doesn’t give one much confidence in models), but does give insight into the various models as best we can tell.	[24]Merlis, T. M., Guendelman, I., Cheng, K.-Y., Harris, L., Chen, Y.-T., Bretherton, C. S., et al. (2024). The vertical structure of tropical temperature change in global storm-resolving model simulations of climate change. Geophysical Research Letters, 51, e2024GL111549. https://doi.org/10.1029/2024GL111549
40	4	Part of the problem here may be which part of the stratosphere is sampled and the importance of interannual a variabilities in the lower part of the stratosphere. [25] have shown that including the stratosphere as defined from 25 to 50km there is high confidence that the cooling signal caused by CO2 increase is detectable and beyond the noise levels of the natural and inter annual variability in the lowest part of the stratosphere. We should put this debate to rest. Santer et al. (2023 has been added to the references with this text: Santer et al. (2023) use updated data to show that a cooling trend has not re-emerged in the lower stratosphere.	[25] B.D. Santer, S. Po-Chedley, L. Zhao, C. Zou, Q. Fu, S. Solomon, D.W.J. Thompson, C. Mears, & K.E. Taylor, Exceptional stratospheric contribution to human fingerprints on atmospheric temperature, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 120 (20) e2300758120, https://doi.org/10.1073/pnas.2300758120 (2023).
42	2	Given the large uncertainties in obtaining data over much of the Northern Hemisphere, using a smaller regional analysis to discount the models may be inappropriate. We should that this remains a question we need to resolve developing better datasets with more seasonal and sub-seasonal coverage to test the model on a global scale The reviewer’s points are fine but it is important in the context of this report to point out discrepancies in the way models on some key continental-scale metrics such as, in this case, snow cover. This section directly addresses a region that is important to estimates of the Social Cost of Carbon in the context of agricultural productivity, again reiterating that the models are not fit for the purpose of policy making.	
44	3	This statement from [26] refers to the fitness of global scale models to resolve regional scale features and argues for developing model at higher spatial resolutions. Using downscaling and other techniques additional insights can be gained at regional scales and provide information for a set of 'purposes'. However, we should work on getting to regional and local scales with GCM as quickly as possible. The current model structural forms may not be adequate for resolving all of these issues merely by increasing spatial resolution. Simulating change at regional to local scales depends on getting the internal variability of the ocean correct, which is only partly a resolution issue.	

47	2	Looking for trends or estimating trends in extreme events in current and future climate is not necessarily an attribution study. Estimating frequency, duration and intensity of events helps understand the changing range of the hazard (if there is one). An attribution would be to find to what extent a particular event is influenced or affected by increase in CO2. I would consider these two not to be the same. We explain the distinction between detection and attribution	
47	3	Attributing any single event to changing climate is perilous, agreed. Yes.	
47	5	As noted by [26] there is not yet any strong evidence that LPT <i>[sic]</i> is a fact We have eliminated mention of LPT explicitly, but retain elements of the text surrounding long term variability.	[26]Cohn, T. A., and H. F. Lins (2005), Nature's style: Naturally trendy, Geophysics. Res. Lett., 32, L23402, doi:10.1029/2005GL024476.
57	2	I am not sure how one can conclude that the temperature extremes have decreased based on figure 6.3.4. If I understand correctly the Tmax-Tmin for each year was tabulated and a mean of this difference averaged over the 100+ years was subtracted from these values to get some thing like a anomaly. This anomaly seems to have moved from +3F to -3F over the course of q00 years and now trending upwards again. This suggests to me that there has been significant changes in the extremes over the years and the most recent trend is towards warmer highs? Figure 6.3.3 clearly shows cold extremes have decreased on a centennial scale while warm extremes haven't changed much. In Figure 6.3.4, for each station and each year, the hottest day and coldest night are determined and their difference computed. These differences are then geographically averaged for the CONUS and then an overall average is removed to show the results as a type of anomaly. Reviewer 1 is correct, as indicated in the text, Tmin temperatures are almost universally rising more rapidly than Tmax, hence, the difference (or range) has declined overall. A check of CMIP6 models for the CONUS under ssp4.5 shows half with TMax rising faster than TMin and (obviously) half vice versa – so there is no clear signal from models that matches the observations. The flattening (or slight rise in the metric) in the past 20 years is clearly within the natural range, but does reveal an interesting stair-step pattern with rapid declines centered around the 1940's and 1990's and relatively flat periods in between. An explanation is under investigation, and a leading hypothesis is that there was rapid growth of manufactured surfaces around weather stations in the 1940s. Then, in the 1960s-80s many stations were re-located to relatively rural airports, which then experienced subsequent growth in manufactured surfaces around their weather stations in the 1990s. Thus, rapid nighttime warming in the 1940s and 1990s.	

58	3	The NCA5 is suggesting that the western US is experiencing increase in extreme heat (page 57, para 4); it seems like figure 6.3.5 establishes the fact and not contradict. There was no claim of pervasive (all CONUS) increase in the report We have deleted the sentence “The NCA5 heading “The Risk of Temperature Extremes is Changing” suggests pervasive positive trends are now being observed in threshold temperatures, but that is not evident in the figures above.” It isn’t worth going into more detail in this report	
59	4	The definition of heat wave as consecutive 6 days seems to be a special case. The standard definition is exceedance of 85 or 90 percentile for 2 or more days. I can't check with NCA5 as it was taken down from the web As correctly suggested by Reviewer 1, there are numerous ways to define a heat wave. CWG chose to follow one definition discussed in NCA4 (pg 191) and use 6 consecutive days with Tmax > 90th percentile so as to allow for consistent comparisons. However, changing the parameters will do little to alter the fundamental result that the 1920's to early 1950's contain the major heat wave events for the CONUS.	
60	1,2	Figure 6.3.6 establishes that heatwaves as defined here have increased in the west and have shown increasing trend all over CONUS in the past 50 years. [27] shows the results for the last 60 years and there is little doubt that there is an increase over most of the CONUS, again the NCA5 report is off the web; figure 6.3.7 shows the heat waves are monotonically increasing from the 1960. Including the longer data is only interesting in the dust bowl 1930 camouflage the signal somewhat for the Midwest and central plains. The problem of taking averages over large regions (for example entire CONUS) is that it kills the peak signals and smooths out the emergent climate change indicators. Doing continental averages to look for extremes is really not very useful. Secondly, there is no particular reason to assume that the climate change signal (i.e. the number of heat waves) should showing up 100 years ago, as the CO2 in the atmosphere started to be of significance in the last 50 years. As discussed in the CWG text, the EPA chart is (1) based on nighttime temperatures in the 50 largest US cities and (2) begins in 1961 which was the start of the coolest decade in over 100 years, thereby preconditioning the chart to have an upward trend. Urbanization is most clearly seen in nighttime temperature increases so this does not represent a change in the background climate, but more likely the local climates of cities. Rural areas show less nighttime warming. And, avoiding earlier warm periods does not provide information on the larger scale of natural variability. We have added a sentence at the end of Section 6.3 “Irrespective of the ultimate cause of regional trends, heatwaves have important effects on society which must be addressed, as we discuss in Chapter 10.”	[27]https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-heat-waves

61	4	averaged over all stations in the region, none of these trend parameters is statistically significant'. This is again how one would be looking at statistics of extremes in precipitation. As we know, precipitation is highly heterogenous and location dependent. As observed there are trends even with the approaches chosen by the authors of this study compared to NCA5 and averaging that over and saying there is no trend seems disingenuous. We summarize the site-specific trends as well as the regional average. The rationale for looking at the regional average is that a GHG signal should cover a wide area.	
62	2	same argument as above We summarize the site-specific trends as well as the regional average. The rationale for looking at the regional average is that a GHG signal should cover a wide area.	
63	box	again the issue here is that we are talking about events that are happening in a short-time and over a small region. Averaging over time and space and develop statistics is probably not appropriate when we are talking about events such as the recent flooding event in Texas. If you average that event over 30 days, it will seem unremarkable. Extreme event totals are 1-day to 5-day,s depending on section discussed. The point being made in the Box is that if you use a too-short record you may underestimate natural variability. We're not sure how the reviewer's comment challenges this.	
64	1	As noted in NCA5 and shown in the analysis presented in figure 6.4.4 there is a clear trend of increase in extreme precipitation in 12 of the 27 stations analyzed. Again averaging over the entire region is not the best method for picking extreme precipitation events that are local both in time and space. We summarize the site-specific trends as well as the regional average. The rationale for looking at the regional average is that a GHG signal should cover a wide area. Also in this case we point out that the NE behaves differently than other regions.	

69	2	However, there is evidence that flash droughts, which last weeks have increased over the Northeast and Midwest [28] The paper referenced by Reviewer 1 begins with data so recent (1999) that it cannot provide evidence for long-term changes in drought as evidenced in the US Drought Monitor (DM) even though it suggests an increase in "flash droughts" over that period. Keep in mind, the DM is a product of subjective interpretation and objective measures - objective measures that have changed considerably during the past 25 years – thus is not metrically consistent. (One of the CWG authors was an official contributor to the DM for 15 years.) One would wonder what would the 1920's. 30's and early 50's reveal if the DM was operational back then? A more consistent metric is provided in CWG Fig. 6.7.1.	[28]Ronald D. Leeper, Rocky Bilotta, Bryan Petersen, Crystal J. Stiles, Richard Heim, Brian Fuchs, Olivier P. Prat, Michael Palecki, Steve Ansari
70	2	More recent analysis indicate forest loss due to wildfire accelerating over the recent past[29]. In particular there has been an increase in extreme fire radiative power with a 2 fold increase from 2003 to 2023 (period of satellite data availability)[30][31]. However, that these fires are not out-of-sample and there is a fire deficit as shown in figure 6.8.2 should be acknowledged. But this doesn't alleviate the concern that wildfire is leading to lot of socio-economic concerns and needs to be addressed[32] New sentence added: However there is evidence that the intensity of fires in some regions is worsening (Cunningham et al. 2024) and that wildfires resulted in a net loss of global forest cover over 2001-2019 (Tyukavina et al. 2022).	[29]Tyukavina Alexandra , Potapov Peter , Hansen Matthew C. , Pickens Amy H. , Stehman Stephen V. , Turubanova Svetlana , Parker Diana , Zalles Viviana , Lima André , Kommareddy Indrani , Song Xiao-Peng , Wang Lei , Harris Nancy; Global Trends of Forest Loss Due to Fire From 2001 to 2019, Frontiers in Remote Sensing.Volume 3 – 2022,2022. [30]Cunningham, C.X., Williamson, G.J. & Bowman, D.M.J.S. Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth. Nat Ecol Evol 8, 1420–1425 (2024). https://doi.org/10.1038/s41559-024-02452-2 [31]Patrick H. Freeborn, W. Matt Jolly, Mark A. Cochrane, Gareth Roberts, Large wildfire driven increases in nighttime fire activity observed across CONUS from 2003–2020, Remote Sensing of Environment, Volume 268, 2022,12777 [32]Parks, S.A., Guiterman, C.H., Margolis, E.Q. et al. A fire deficit persists across diverse North American forests despite recent increases in area burned. Nat Commun 16, 1493 (2025). https://doi.org/10.1038/s41467-025-56333-8
71	3	The question of forest management and its role on wildfire frequency and intensity is interesting and deserves further study. We agree	
80	1	The global mean sea-level was increasing at a rate of 0.08 inches/yr in 1993 compared 0.18 inches/yr in 2023, almost double the rate[33], which is approximately what is needed to meet the NOAA projections by mid-century and seems plausible. We discuss the NOAA projection for a specific site in the context of high-quality, long-term tide gauge data, but offer no comment on its plausibility. Extrapolating satellite-derived accelerations post 1993 is a perilous business given the well-documented variability of GMSL rates on multi-decadal scales.	[33]Hamlington, B.D., Bellas-Manley, A., Willis, J.K. et al. The rate of global sea level rise doubled during the past three decades. Commun Earth Environ 5, 601 (2024). https://doi.org/10.1038/s43247-024-01761-5

88	3	A possible reason the method used by IPCC (optimal fingerprinting) can be considered to address McKitnick criticism is in [34] We cite Chen et al. They mostly just reiterate the same points as McKitrick (2022). They propose a resolution to one part of the problem but it requires very restrictive assumptions.	[34]Chen, H., Chen, S.X. & Mu, M. A statistical review on the optimal fingerprinting approach in climate change studies. <i>Clim Dyn</i> 62, 1439–1446 (2024). https://doi.org/10.1007/s00382-023-06975-5
92	4	The role of clouds remains the single most uncertainty in climate modeling, I am glad this was acknowledged here. Agreed	
93	3	The substance of this paragraph was addressed in my comments in earlier sections. Some of the claims made here are either exaggerations of the usual practice (RCP8.5 being referred to as BAU) or the comment about not fit for purpose (a comment extracted from a publication that is calling out for cloud resolved models. Presumably the reviewer agrees RCP8.5 should not be used as a BAU scenario, so we are in agreement. The Palmer and Stevens paper nonetheless says the models are not currently fit for purpose, an observation echoed by the Nissan et al paper cited..	
105	2,3, 4,5	The problem with both the FACE studies and the soybean. Maize and wheat studies cited here are that they don't consider the effect of increase in temperature, changes in precipitation, humidity and other environmental factors along with CO2 increases. These compound effects have been shown in wide number of studies [35] [36][37][38][39]. A meta analysis of the compound effects shows that increase in CO2, along with temperature, precipitation changes effects the quality of the cereal and yields[40]. Another recent study evaluated the impacts on C3 and C4 crops and conclude that CO2 enrichment for C3 crops could increase but will be compensated by temperature increase. CO2 fertilization effect was found to be small for C4 [41]. It is important therefore that we consider the compound effects on crop yields and not just focus on CO2 enrichment. The reviewer is correct that compound effects need to be considered, and indeed one of the problems with a lot of econometric papers on climate change and agriculture is they only look at heat and ignore the CO2 enrichment (Taylor and Schlenker being an important exception). Since our remit was impacts of CO2 emissions a brief discussion of FACE plot experiments and other CO2-only experiments is on topic. We discuss meta-analysis of multivariate (compound) experiments in Section 9.3.	[35] Ruiz-Vera UM, Siebers M, Gray SB, Drag DW, Rosenthal DM, Kimball BA, Ort DR, Bernacchi CJ. Global warming can negate the expected CO2 stimulation in photosynthesis and productivity for soybean grown in the Midwestern United States. <i>Plant Physiol.</i> 2013 May;162(1):410-23 [36] Levine LH, Richards JT, Wheeler RM. Super-elevated CO2 interferes with stomatal response to ABA and night closure in soybean (<i>Glycine max</i>). <i>J Plant Physiol.</i> 2009 Jun 1;166(9):903-13. [37]Večeřová K, Oravec M, Puranik S, Findurová H, Veselá B, Opoku E, Ofori-Amanfo KK, Klem K, Urban O, Sahu PP. Single and interactive effects of variables associated with climate change on wheat metabolome. <i>Front Plant Sci.</i> 2022 Oct 10;13:1002561. [38]Thomas, J.M.G., Boote, K.J., Allen, L.H., Gallo-Meagher, M. and Davis, J.M. (2003), Elevated Temperature and Carbon Dioxide Effects on Soybean Seed Composition and Transcript Abundance. <i>Crop Sci.</i> , 43: 1548-1557. https://doi.org/10.2135/cropsci2003.1548 [39] Lesk, C., Anderson, W., Rigden, A. et al. Compound heat and moisture extreme impacts on global crop yields under climate change. <i>Nat Rev Earth Environ</i> 3, 872–889 (2022). https://doi.org/10.1038/s43017-022-00368-8 [40] Ben Mariem S, Soba D, Zhou B, Loladze I, Morales F, Aranjuelo I. Climate Change, Crop Yields, and Grain Quality of C3 Cereals: A Meta-Analysis of [CO2], Temperature, and Drought Effects. <i>Plants.</i> 2021; 10(6):1052. https://doi.org/10.3390/plants10061052 [41]Rezaei, E.E., Webber, H., Asseng, S. et al. Climate change impacts on crop yields. <i>Nat Rev Earth Environ</i> 4, 831–846 (2023). https://doi.org/10.1038/s43017-023-00491-0

106	1	Taylor and Schlenker 2021 also note that 'Climate change will likely have negative impact on agriculture in aggregate, especially in regions exposed to extreme heat. And the CO2-driven yield increases may be offset by effects on food nutrition and quality'. However, the results for US have been a net positive in the recent past but not true in the lower latitudes. Extreme heat may be a net negative, but thus far the overall effects have been positive. Regarding nutrition loss see Section 9.4	
111	1,2	The criticism of NOAA Billion dollar map is likely warranted as it was never completely transparent how the data was generated. However, changing the baseline assumption and refactoring the data using a different set of criteria to make the effects smaller also doesn't make sense. We should continue collecting this data and make the data accessible for researchers and peer review. Figure 10.1 doesn't address these issues, it is another methodology with unknown provenance of the data. We agree that data collection, dissemination and transparency are key. Fig 10.1 is traceable as an indicator though we don't regard it as the final word on the subject either. .	
117	3	Climate change can be expected to increase cold weather extremes in regions that have not been exposed to these effects The reviewer's point is unclear.	
118	3	The same Nobel prize winning model in its most recent study concludes that [42] "We conclude with three results relevant for climate policy. First, both current policies (base run) and the extended Paris Accord fall short of limiting global warming to 2 °C or to the cost-benefit optimal level. Second, the economic stakes in global climate policy are substantial, with estimated net present value of economic benefits around \$120 trillion from the cost-benefit optimal policy. Third, once differences in discounting are considered, the baseline DICE-2023 estimate of the social cost of carbon (\$66/tCO₂ for 2020) aligns closely with other recent estimates". Obviously this is the latest and the current version of the model and these results are quite different from thus discussed on this page. These conclusions should also be included in this discussion to avoid selective reading of the literature. We discuss Barrage and Nordhaus (2024) on p. 121.	[42]L. Barrage, & W. Nordhaus, Policies, projections, and the social cost of carbon: Results from the DICE-2023 model, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 121 (13) e2312030121, https://doi.org/10.1073/pnas.2312030121 (2024).

120	1	Similar empirical studies [43] point to "Using an empirical approach that provides a robust lower bound on the persistence of impacts on economic growth, we find that the world economy is committed to an income reduction of 19% within the next 26 years independent of future emission choices (relative to a baseline without climate impacts, likely range of 11–29% accounting for physical climate and empirical uncertainty). These damages already outweigh the mitigation costs required to limit global warming to 2 °C by sixfold over this near-term time frame and thereafter diverge strongly dependent on emission choices. Committed damages arise predominantly through changes in average temperature, but accounting for further climatic components raises estimates by approximately 50% and leads to stronger regional heterogeneity. Committed losses are projected for all regions except those at very high latitudes, at which reductions in temperature variability bring benefits. The largest losses are committed at lower latitudes in regions with lower cumulative historical emissions and lower present-day income". This study uses more of the daily temperature precipitation from 1600 hundred locations world wide instead of global means. There are numerous studies that show the cost, many described in the COP 21 and follow-on meetings The Kotz et al. paper is subject to a cautionary notice at the Nature website that “the reliability of data and methodology presented in this manuscript is currently in question.” https://www.nature.com/articles/s41586-024-07219-0 The literature showing growth effects of temperature increase is pretty robust. And though we don’t cite it, there is a new paper just accepted at Climate Change Economics by McKittrick and Devina Lakhtakia adding to the evidence using 2 newly-constructed global data bases.	[43] Kotz, M., Levermann, A. & Wenz, L. The economic commitment of climate change. Nature 628, 551–557 (2024). https://doi.org/10.1038/s41586-024-07219-0
-----	---	---	--

Page	para	Comment or Suggested Edit
		The report indicates numerous examples of uncertainties in climate science. It would be extremely helpful if these undertainties were made more explicit, listed in a concluding section, and prioritized in some way - what are the top 10 priority research areas? If the opening remarks by Secretary Wright and the title pointed to uncertainties and the need for more research, I believe this report will be better received. As I read the report and left review comments below, I bolded items where I gather the authors imply that research is needed. Consider including these kinds of statements throughout and adding a summary. An interesting suggestion but with the time constraints this must be deferred to a separate report.
viii	3	This would be more correct: "Some scenarios of future CO2 emissions overestimate observed levels" Sentence has been removed
viii	5	This would be more correct: Some detailed climate models run “hot” in their simulation of the climate of the past few decades, while many have underestimated the amount of surface warming. More research is needed to select the most skillful and reliable models. The need for more research on model development is implicit. Again, this would be a good topic for a separate report.
viii	6	Need reference for: "Claims of increased frequency or intensity of hurricanes, tornadoes, floods, and droughts are not supported by historical data." More research is needed to identify how frequency and intensity of weather events are affected by environmental conditions. The ES statements are all supported by the document chapters; references will be added to specific sections.
4ff		It is misleading to separate the photo-chemical effects of CO2 from the temperature effects. Extreme heat is hard on plants, causing them to lose water, close stomata, etc. It depends on the plant and the degree of heat. More research is needed to understand how the temperature (mean and variability) affects plant productivity and resilience. 1st paragraph of Section 2.1, we added sentence “Here we focus just on CO₂ fertilization; research on combined effects due to temperature and precipitation changes are discussed in Chapter 10.”
7		Again it is misleading to separate the CO2 and the temperature effects on the oceans. The warming surface waters is having significant impact on ocean fish and habitats due to the overall increase in global temperatures This section is specifically on changing alkalinity. We haven’t included a review of temperature effects on fish populations: it is one of the impacts topics we were not able to survey.
14	4	More accurate to say "because their effect remain largely unknown". Good examples include natural aerosols (sea salt, dust, biogenic aerosols). Are there others to mention? More research is needed to understand radiative effects of both natural and anthropogenic sources of radiative variability throughout the atmospheric column. Sentence added: “Natural sources of global energy imbalance other than volcanoes and total solar irradiance (TSI) are not included in these graphs because their effects remain largely unknown.”
17	figure	What scenarios are the models using in this figure? SRES, as stated in text, also others including Hansen A,B,C and others as described in the Hausfather et al. paper.

19		Vegetation is only one way that CO2 is accommodated by land processes, the other is through soils and microbial processes Microbial dynamics is complex and challenging to understand but may also be a way to boost CO2 absorption by soils (which also enriches the soil nutrients!). More research is needed to better understand how plants and soil systems remove CO2 from the atmosphere. Noted.
19	5	More research is needed to improve the understanding and representation of land systems, carbon and nutrient fluxes in models. Noted.
20		Carbon uptake by oceans and ocean ecosystems is less well studied and modeled. The lack of spread of carbon in ocean models may result from insufficient information, ocean biogeochemistry, ecosystems and model development. More research is needed to study and model carbon, nutrient and ecosystem processes and dynamics in ocean models. Noted.
		More research is needed to map warming trends in urban, non-urban and other environments and to ensure accurate representation of regional and global trends in temperature. Noted.
27	2	"This practice" - need to clarify whether this refers to "emergent property" or discarding. I believe the authors mean the latter, but it should be made more clear Sentence rewritten: "Parameter tuning to yield an ECS target was commonplace for the models used in AR4; modelers have moved away from this practice with time."
27	3	"assumed positive cloud feedback" - this is an emergent property too, based on simulation/observation. Should be rephrased to not use the word "assumed". Further research is needed to better understand and model how clouds change with temperature and what the feedback effects are on the radiative balance. Sentence has been rephrased without the word "assumed".
		Further research is needed to narrow the uncertainty on climate sensitivity, both using models and observations. Noted.
33		The text and figure refer to 33 models, which would include the best and worst. How much does the uncertainty/range change for a subset of best-performing models? The modeling community doesn't have a leaderboard of best-to-worst models. Some of the "prestige" models from the US and UK have very high sensitivities, but they are preferred by many users for particular applications.
34	figure	How many models are included in each case? High ECS 14, Medium ECS 11, Low ECS 13. This has been added to Figure caption.
36	figure 5.4	How are the lower and mid-troposphere defined? Standard definitions in the paper: LT surface to ~9km, MT surface to ~15 km. Added in the Fig caption.
37	4	"excess amplification" - amplification of what? And Figure 5.6 shows tropics, is this bias only tropical? Sentence changed: "Another important model-observational discrepancy is the excess amplification or warming with altitude..." The bias is only observed in the tropics but the amplification pattern is only predicted in the tropics. Also bear in mind the tropics is nearly half the atmosphere and is where most solar energy enters the climate system.

38		Further research is needed to improve how models represent clouds and dynamics; additional observations are also needed to improve these representations. Noted.
42		Further research is needed to improve how models represent planetary albedo to align with observations. Noted.
		The greater concern with hurricanes is the amount of moisture they carry and drop after landfall, i.e. flooding. While this is an active area of research, it is worth noting that this may be the bigger issue for hurricane change with warming This is covered in the AR6 assessment as quoted, as it's one of the intensity metrics. Currently too little data to assess for trends.
56-57		The concern for many are the extreme hot temperatures without night-time cooling that provides an opportunity for recovery. This section doesn't address this. In this regards, the focus on the difference between extreme hot and extreme cold is misleading when generalizing about decrease in extremes (figure 6.3.4) - the decrease is because we don't have as much extreme cold. This metric is covered by the data in Sct 6.3.3.
60		Combining heat and humidity as a measure of extreme heat is not unusual since it is this combination that is most impactful to human health - the body cannot cool if the humidity and heat are both high. Since a warmer atmosphere holds more moisture, and CO2 causes heat (and therefore moisture) to increase, this combination is a relevant assessment of the effects of CO2 on extreme conditions that make it difficult for people. Also combining with urban regions is helpful since that is where most people live. These points are not made in the report and are important. Sentence will be changed to read: "Given the heatwave definition and urban focus, while these increasing values since 1960 point to a growing human impact they are not informative about long term trends or..." Added sentence at end of paragraph (Irrespective of the ultimate cause of regional trends, heatwaves have important effects on society which must be addressed, as we discuss in Chapter 10), which should address reviewer concerns.
		Patterns and variability of precipitation are poorly understood and models are particularly challenged to represent and predict precipitation, further research in this area is needed Noted.
		The authors rightly describe the extreme uncertainty regarding sea level rise. It would be helpful to add some information about the complex, highly nonlinear and uncertain processes involved with ice-sheet dynamics and ice-sheet - ocean interactions that are especially key for Antarctica. More research is needed to study and model ice sheet dynamics and ice-sheet ocean interactions. Noted. Canvassing ice sheet and ocean dynamics in that much detail beyond our scope but would belong in a separate report.
84	3	Further research is needed on climate variability, effects of ocean circulation, solar variability, model simulation of variability and statistical methods. Noted.
87-88		Anthropogenic aerosol effects may also influence the inflections in temperature in ways that are challenging to account for Noted.
91	2 and 3	Reductions in aerosol indirect (cloud brightening) effects may also explain the reduced planetary albedo, not just from ships but from reduced fossil fuel aerosols coming from the continents, China and east asia especially. This paper describes the reduction in aerosols https://www.nature.com/articles/s41612-023-00488-y This is another area that needs further research! Noted.

94	table 8.1	What are the numbers in the 3rd column? Please include in the caption. Good point. Added to caption: “Numbers refer to footnotes in original source that specify locations or region-specific confidence levels.”
95	2	I don't see an inconsistency between what Ch 11 and Ch 8 say. The first is about precipitation, droughts, tropical cyclones, heat - overall. The 2nd (ch 8) is about specific types of events in specific regions. Suggest to soften the statement about the contrasting assertions. Sentences at issue are “Evidence of observed changes in extremes and their attribution to human influence (including greenhouse gas and aerosol emissions and land-use changes) has strengthened since AR5, in particular for extreme precipitation, droughts, tropical cyclones and compound extremes” versus “No evidence of emergence in the historical period of a change in river floods, heavy precipitation, drought, fire weather, severe wind storms, and tropical cyclones”. These statements are manifestly in conflict.
		The science of attribution of extreme events is challenging and computationally expensive; this is an area where further research is needed with potential to use AI to improve statistics Noted. Not sure about the computationally intensive point: many just run univariate GEV models and overinterpret the results. AI won't fix the bad methodology.
104		This section seems to gloss over many key points. Certainly there are limits where extreme heat and drought (water is key) could be detrimental to crops. It also depends on which crops. There is extensive literature on how certain crop viability is shifting. So a region with particular crop experience and cultivation may no longer be able to sustain that agriculture. There is cost to shifting crops across regions and farmers that needs to be accounted for. And water is key - is there enough water in various regions for energy (power plants need water) as well as agriculture when conditions are very hot for sustained periods? The comment seems to be about the validity of the underlying literature rather than our summary of it. The econometric literature tries to synthesize patterns over large areas to get at overall trends, rather than the agronomy focus on specific sites and crops.
111		Severe weather continues to disproportionately impact lower income communities as well as business that requires outdoor exposure. A thorough analysis would need to include these points and I recommend adding this caveat to the section. This is specifically addressed in Section 10.3.2
		Related to my previous comment, deaths due to extreme heat conditions appear to be increasing, particularly for certain populations and for those with underlying health conditions (which can be hard to detangle when attributing mortality). For example https://jamanetwork.com/journals/jamanetworkopen/fullarticle/2792389 Again this topic is specifically addressed in Section 10.3.2
114		An additional concern is if the grid fails under either extreme heat demands or cold/severe-storm events, the impact on communities will not be uniform and depends on grid infrastructure which can be better in more affluent communities Good point. We don't discuss what makes for grid stability versus instability, especially in the context of many jurisdictions closing reliable power plants and opting for intermittent renewables, but the correlation between extreme weather and the likelihood of power failure is an important topic.
		The impacts of sea level rise and coastal inundation on coastal communities and in low-lying countries should be addressed. This will have impacts particularly on certain countries/regions but also on world economics Good point. The topic is germane but runs into the limits of what we can cover in our limited time. To some extent it is covered in the economics chapter since IAM damage functions include effects of sea level rise on coastal areas.
		Research is needed to better understood the likelihood and impacts of various tipping points, including changes to ocean circulation patterns, ice sheet acceleration, sea-ice loss, die-off of tropical forests, thawing of permafrost, etc. Noted. Hopefully our discussion clarifies the different types of “tipping point” topics.

		Do the authors think it worthwhile for private or public research, such as at DOE, to seek breakthrough technology that might effectively remove massive amounts of CO2 from the atmosphere? No comment
--	--	---

Chapter Number	Page Number	Approximate Paragraph Number	Comment or Suggested Edit
	i		In general, criticism and re-analysis of past research is always welcome. This report summarizes some substantial concerns from a small group of researchers. The report should be reframed to reflect this and I provide some suggestions in a later comment. I suspect that simply publishing this report will not offset the hundreds of reports and publications on CO2 and Climate that have come before it. But, new analyses and communication within and outside the research community could make a positive difference, should the findings in this report be substantiated. The DOE Office of Science BER could be provided an opportunity to address the research uncertainties in this document in a thorough and robust manner. Noted.
	iii	1	As someone who used to read the DOE reports on CO2 as a graduate student in the 1990s and then conducted numerous analyses of carbon on many topic areas which were later confirmed by numerous other analyses, it seems somewhat cavalier for DOE to issue one brief conclusive report on the "impacts of carbon dioxide emissions". I suggest the following option: Change the title to "Topics of Uncertainty on the Impacts of Carbon Dioxide Emissions on the U.S. Climate" or " An Assessment of CO2 Impacts on Climate to Guide Future Research ", and then use this report to drive research/analyses for each report chapter which would conclude in separate topical reports that could be finished within a year or two. In doing so, the DOE would positively contribute to addressing some of these standing issues and hopefully enable the nation to move forward in a more productive manner. Noted. New title: "A Critical Assessment of the Impacts of Carbon Dioxide Emissions on U.S. Climate."
	vii	Forward	I appreciate the perspective. It could be useful to add or edit the Secretary's Forward to indicate that " the report has been purposefully commissioned to researchers with alternative perspectives in an effort to address these perspectives and provide some closure for the American public, the US Economy, and US energy policy. " I suggest this, because it will be very obvious that a handful of skeptics were chosen out of literally hundreds of extremely active and well-respected scientist. Addressing that upfront will immediately reduce criticism, and hopefully generate a positive environment to address these issues. Everyone would like to see convergence of findings on these issues. Noted. The suggested sentence is not well-phrased, but the reviewer is correct that everyone will see the names and know that the document is coming from a particular perspective. The problem is no such concerns were expressed when people with known biases got put in charge of NCA or IPCC chapters. The path to convergence starts with the wider community admitting that they've been keeping a lid on the necessary discussions. In any event, we do not have any control over the Secretary's Foreword
	viii	2	Any increase in greening from additional CO2 will likely be more than offset by longer growing seasons with higher temperatures (i.e., more days over 100). This causes serious risk to the US midwestern "bread basket", which is why this has been considered a national security concern. The data supporting this trend has been published a few times now in Science by a fellow out of Stanford, among others. Sources: Lobell and Field. 2007, doi: 10.1088/1748-9326/2/1/014002; also Sloat et al. 2020, doi:10.1038/s41467-020-15076-4 has a thorough introduction with many citations. The effects, including compound effects, on Agriculture are addressed in Ch 9

	viii	3	My understanding is that the upper bound of emissions (i.e., very high) is business as usual, with no mitigation, and a high-end of growth. It's a worst, yet plausible, case scenario. Similarly, the lowest emissions (i.e., very low) scenario includes technologies that don't yet exist including significant CO2 removal. Both are there to understand plausible extremes. The more likely scenarios are the low to high scenarios. I'm sure researchers are open to revisiting how things are bounded and presented if there are reasonable objections. It seems that within the expert community people are quick to set RCP8.5 aside as a fringe scenario. The problem is it dominates the impacts literature and the media coverage thereof. So the critical discussion herein is needed.
	viii	4	This may be true. But data driven analyses may not capture anticipated feedbacks. They attempt to by design. Limited by data especially ocean heat content, but they take it into account.
	viii	6	I am a big fan of data and meta-analysis. However, I'll note that I do not think forest management practices are overlooked. In fact, it is one of the main driving story lines (i.e., too much fuelwood exists, so we need to harvest more forest). There remains strong debate on the efficacy of fuelwood removal over large areas as an effective means of wildfire reduction. The key to this analysis is to look at whether the extent (not the numbers) of fires has grown and whether the burned areas are returning to forests or returning to brush or grassland. If it's the latter, then that is more likely due to regional changes in climate (temp and precipitation). Again the issue may be what experts discuss among themselves versus what's out there publicly.
	viii	8	I think we can point to sea-level rise in south florida, crop damage, and disease vectors fairly easily. I'm not aware of what costs are associated with these 3 items, but I suspect it's quite large. Dealt with in Ch 11 on economic costs and the SCC.
	viii	9	Yes, this is an important paragraph. Most scientists are not activists. Just because there is a science finding, scientists don't expect that to turn into policy. The public and the democratic system can determine the policy using an evidence-based risk/benefit analysis, just as noted here. Opening up this conversation (which should have been done decades ago) would be welcome and would better engage the public on this issue. DOE could in fact take a leading role here and help address a major national issue. A point of sincere agreement.
1	2		This is all generally correct. I would like to think this is common knowledge. Yes but bears repetition
2	4	1	Why use studies based on satellite sensors? I'm quite sure there are studies (again, out of Stanford) that use historic yield data (county-scale USDA data and global FAO data) with associated temperature and precipitation data. Those analyses do not agree with your findings here, I think. But, we can certainly pose these questions to our scientists that study and develop land models and develop a report based on all available data. I'll also note that for sometime data synthesis wasn't considered fundamental science and was therefore largely ignored. Enabling the researchers to conduct robust data analyses on this and other topics would be largely welcomed. See Ch 9 on Ag effects for the studies on yield data.
2	5	Figure 2.2	All data is interesting and useful for perspective and understanding. But isn't the main question whether we are driving up CO2 and temp at a rapid pace in the post-industrial era? This graph does not help answer that question. Figure 2.2 has been deleted.

2	7	3	Stating that increased aridity in drylands will not lead to decreased productivity seems a bit questionable. We can point to precipitation gradients from high to low precipitation that supports forests to grasslands to shrublands, respectively. Less water in general will mean less productivity; this can be seen in different forest compositions as well. The authors cite Zhang et al. (2014), but Zhang's main point is that the direct CO2 effect may be causing greening in drylands that offsets the decreased precipitation. This may be more specific to dryland vegetation, and Zhang et al. specifically state that this finding is relevant to north-east Brazil, Namibia, western Sahel, Horn of Africa, and central Asia. Zhang 2024, not 2014. The point here is to explain benefits of higher CO2 in terms of crop water productivity. Zhang acknowledges increase in desertification (as we note) but points to a global pattern of greening in arid areas.
2	9	3	I do not disagree with this observation of a decline effect, and I have seen it in some of the early biomass energy analyses that appeared in prominent journals and were then corrected over a few years. While it is unfortunate that some try to grab headlines with unsupported assumptions, it does seem that other researchers tend to provide counter arguments and analyses fairly quickly, indicating that the system does in fact work fairly well. Yes, part of the problem is the later counter-evidence gets relatively little attention, hence this report.
3	19	last	Yes, CO2 uptake by land processes have uncertainty associated with them. It's worth noting that DOE researchers (many of whom are retired now) were world-leading and making progress in this area, but nearly all work on CO2 uptake and emissions stopped 10-15 years ago due to political pressure and political concerns. The Carbon Dioxide Information and Analysis Center at ORNL, now cancelled, was a main contributor to the Global Carbon Project. Now the US is woefully behind and ceding expertise on this to the Europeans (as cited in this report). We are also ceding expertise on carbon monitoring via satellites to other countries. There's nothing necessarily wrong with this if this is where the US wants to go, but it's important to recognize that we have lost significant capacity due to policy changes over many years. We specifically recommend the government increase its focus on basic climate monitoring and data dissemination in the "Concluding thoughts" section. The CDIAC was very valuable and we lament its closure.
5	44	1	Some of the early work on this topic was done by researchers at Stanford. But there are plenty of other papers. Here's one that came up in a quick search: https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.0906865106 We discuss this paper in Ch 9.
5	44	1	Contradicting a number of large meta-analyses on the topic of decreased yields with increased temperature is ok. That's what science is all about. But it's going to have to be done in a more robust way than a couple paragraphs here with one or two citations. This section concerns temperature trends in the corn belt; the discussion of yields is in Ch 9.
6	47	chapter summary	This is very important. I have not dug into the data on extreme storm data (both numbers and intensity). Getting researchers together that disagree on a topic, analyze the data, and publish findings together can be very productive. DOE could sponsor a workshop and bring together a broad range of experts and find answers to extreme weather trends. Good idea

6	47	chapter summary	I conducted some analyses on wildfire years ago. I saw the bias in the university textbooks and in the wildfire working groups, who essentially went by textbook teachings. It was rare that people went back to the original data. The last time I checked the actual data (a good 10 years ago), I found that...you're correct...the number of fires had not changed much. What does seem to be changing is that the extent of fires has grown, and this is mostly attributable to hotter and drier conditions. I do not believe there is more fuel load now than there was before the US was settled. Arguing that harvesting will decrease fire is nonsensical; you have no idea where the lightning is going to strike and subsidizing the thinning of all forest in the western fire zone would be cost prohibitive. I think we need to stop using wildfire management as a justification for harvesting. If we want to harvest more, than do it, and stop using fuel load arguments (which is more of a concept than proven reality) as a reason to do it. The biggest issue here is encroachment of housing communities into the Wild-Urban Interface (WUI) and how we want to handle that with policies. Fire is really only bad if it's burning someone's house down. Otherwise, it's a natural progression in forest dynamics. Sources: Campbell et al. 2012. doi:10.1890/110057.; Schoennagel and Nelson. 2011. doi:10.1890/090199. Excellent comments. It's a big topic we can only glance at but we are trying just to get some pertinent data into the discussion.
6	57	6.3.2	The NCA5 is cited here and elsewhere. However, the USGCRP website that hosts the NCA reports has been removed. Hence, there is no way to read and review the referenced findings. This DOE report is therefore arguing against something that no longer exists, and that may appear questionable. Noted. Out of our control.
7	74	2	Given the satellite observed ice sheet dynamics, I'm not sure that ice sheet retreat is that hypothetical. Our reference is to hypothetical instabilities, i.e. massive disintegration.
7	all		This is the first time I have seen all sea-level rise estimates discredited by an offset from land subsidence. This is certainly a global dynamic that we would want to capture and understand in Earth system models, and DOE can look into this further with analyses and experiments if necessary. Noted.
8	86	all	This and other chapters cite the IPCC AR6. The IPCC provides a global process to address the issues and uncertainties in this report. Perhaps this report can set a path for pivoting research and re-engaging in a useful manner. That's a big ask.
9	104	chapter summary	The last sentence in this summary is not necessarily accurate. The authors cite Ainsworth and Long (2020) with respect to increased CO2 effects on crops. But, Ainsworth and Long (2020) indicate that increased temp and decreased precipitation will have negative impacts on crops, while increased CO2 may offset some of those negative effects. It is the impact of CO2 on climate and the subsequent impact on crops that is the concern; not the direct effect of CO2 on crops. Re written: "There is reason to conclude that on balance climate change has been and will continue to be neutral or beneficial for most U.S. agriculture"

Chapter Number	Page Number	Approximate Paragraph Number	Comment or Suggested Edit
2	3	2.1.1, para. 2	Zheng not in reference list. Do you mean Zeng? Yes, fixed.
2	3	2.1.1, para. 3	"nearly double"? Why exaggerate? - it's a 76% increase. And they reported that future increase in GPP in extra-tropical northern hemisphere (e.g., U.S.) for [CO ₂] from 300 to 600 ppm of 42%, or 32% more than previous predictions (not 76%). <u>Replace "nearly double" with "much larger than"</u>
2	3	2.1.1, para.1	Zhu also explained that "other factors (OF) not considered in models, such as forest management, grazing, changes in cultivation practices and varieties, irrigation and disturbances such as storms and insect attacks, can be a cause of mismatch between observed and simulated LAI trends.... OF contributes the most to the observed LAI trend over 25.0% (increase) and 5.3% (decrease) of the vegetated area" We don't claim CO ₂ is the only factor.
2	3	2.1.1, para.2	This report is meant to focus on the U.S., so it would be more appropriate to discuss greening trends in the U.S. Fig. 2.1 shows that the trend in LAI across much of the U.S., with the exception of the Southeast, is less than the global average. Negative OF effects are mainly found in northern high latitudes (e.g., Alaska). Growing season warmth is the dominant factor in cold regions (10.1038/s41558-018-0258-y). Significant browning also is occurring in parts of Alaska (10.1175/EI-D-20-0025.1) But the effect is still positive. In Ch 9 we discuss US-specific evidence concerning CO ₂ and crop yields.
2	3	2.1.1, para.2	Greening of the Arctic can have important adverse consequences. Direct observations support that warming and increased vegetation cover in the Boreal-Arctic region showed a "robust increasing trend of CH ₄ emissions (+8.9%) with strong inter-annual variability. The majority of emission increases occurred in early summer (June and July) and were mainly driven by warming (52.3%) and ecosystem productivity (40.7%)." Yuan et al 2024 (10.1038/s41558-024-01933-3). <u>We don't claim it's good or bad, only that it's been observed.</u>
2	3	2.1.1, para.3	Wang et al 2020 (10.1126/science.abb7772) report a decline over recent decades in CO ₂ effects on global photosynthesis, possibly due to increasing nutrient interactions or interactions with effects on LAI. It's a controversial finding that attracted skeptical comments in <i>Science</i> regarding the validity of the satellite data and the statistical methods used https://www.science.org/doi/10.1126/science.abg2947 https://www.science.org/doi/10.1126/science.abg4420 https://www.science.org/doi/10.1126/science.abg5673

			While the authors in reply defend the satellite data, they acknowledge they may not have dealt adequately with confounding non-CO2 factors. So, it seems premature to invoke this result.
2	4	2.1.2	Much of this information in this section is appropriately covered in chapter 9 on agriculture. Chapter 2 purports to have a wider focus (global and environment responses), so it should not dwell on responses of individual crop plants (crops account for only 15% of global GPP). There has been plenty written on ecosystem response to eCO2, but evidence such as Fig. 2.3 is not relevant. All analyses of direct eCO2 effects reveal an overriding interaction with other environmental factors (nitrogen and temperature), and global models show that eCO2 only partially compensates for the negative effects of climate change on ecosystem carbon response. We struggled with how to divide material up in Ch 2 and Ch 9. The solution we came up with was that here we are addressing direct CO2 effects, namely CO2 fertilization; later we discuss Ag effects in more detail. Not everyone paid attention in high school biology. Figure 2.3 serves as an illustration of a point that non-specialists are often surprised to learn, namely that CO2 is plant food.
2	4	2.1.1, last para.	Zhang, 2025 (10.1016/j.ecolind.2025.113762) reported that although vegetation cover was increasing, resilience against external disturbances (drought, heatwaves, wildfires) has simultaneously declined. They use the lag-1 autocorrelation coefficient as the measure of resilience based on Critical Slowing Down theory. The results are suggestive but very noisy and require a lot of assumptions to equate to a loss of ecosystem resilience. Since the authors also show that vegetation cover is increasing at the same time the results don't appear strong enough to merit any change in our discussion.
2	7	2.1.3, para. 2	Cheng did NOT report "increased plant growth"; they reported increased GPP. The distinction is fundamentally important, has been recognized for decades, and is completely ignored in this chapter. Cheng et al. did refer to an increase in Net Primary Production as well, but you are correct they focused on Gross Primary Production. Sentence rephrased "Similarly, Cheng <i>et al.</i> (2017) noted that increased Gross Primary Production from 1982 to 2011 due to rising..." and GPP be added to the Glossary. More generally since GPP and NPP are closely correlated the use of "plant growth" is suitable.
2	6-7	2.1.3	This material is repeated in chapter 9 where it belongs. Here, it would be more appropriate to focus on how eCO2 interacts with drought on ecosystem response (e.g., 10.3390/atmos12020212) We tried to avoid repetition but there is some. We discuss drought in Ch 8: since we don't see global and US trends, the issue of declining CO2 fertilization during droughts isn't a key issue at this point.
3	19	3.2.2, last para.	Regarding the uncertainty in the land sink, a primary reason for this uncertainty is that the primary response of photosynthesis to CO2 does not predict C sequestration because of strong interactions between CO2 and climate, nutrients, stand dynamics, and other factors. That is why the almost complete focus in this report on crop plants and plant responses in greenhouses does not inform us about "CO2 uptake by land processes" We aren't making any strong claims about the land sink, we only report the results in the Global Carbon Project. Not sure if the reviewer is challenging them or not.

9	104	all	This chapter is silent on agricultural effects on atmosphere and climate. Sokal and Kachel 2025 (10.3390/en18092272) conclude: "The current study demonstrated that agricultural activities significantly contribute to the emissions of three main greenhouse gases: carbon dioxide, nitrous oxide, and methane." Emissions from the Ag sector are included in the IAM results discussed in Ch 11.
9	105	9.2, para. 2	The section title is "Field studies..." but the next three paragraphs are primarily about responses of potted plants in growth chambers or greenhouses (with exception of Blandino, which was a field study and showed a much smaller response than the pot studies). There is an important reason that the field data cited in Blandino and in SoyFACE show a smaller response than data from the potted plants under artificial conditions. These data are barely relevant to the topic you are trying to address. FACE plot studies are field studies, and we also discuss other field studies. However we also include some lab experiments. <u>Heading changed to "Field and laboratory studies of CO2 enrichment."</u>
9	105	9.2, para. 3, 4, 5	CO2Science.org website is a highly biased and unreliable website. They report on papers, or specific sentences in papers, that support their view and ignore conflicting reports or qualifying sentences. If there was another site that gathered that much data, we'd cite it. We'd need some evidence of actual bias to disqualify the CO2Science.org archive given the extent of its coverage.
9	105	9.2, para. 3	This is a report for the US. Why are you citing soybean studies in China when there is a major soyFACE study in Illinois? Yield in SoyFACE increased in eCO2 but declined with increasing temperature (10.1093/jxb/erac503). eCO2 did not result in water savings as hypothesized but rather increased soil moisture depletion. (10.1098/rstb.2024.0230) The Chinese study is on point regarding CO2 enrichment. The first study referenced by the reviewer (10.1093/jxb/erac503) only subjected soybean to elevated temperature without varying CO2, so it isn't relevant to our discussion. The second reference is to a general literature survey which doesn't appear to say anything different from what our chapter says.
9	106	9.2, para. 2	Ainsworth et al, 2025 (10.1093/jxb/erac503) state: "Early season stimulation in biomass at elevated [CO2] more than offset lower stomatal conductance in crops, resulting in greater depletion of soil moisture, instead of water savings [30,31]. Wheat tiller survival and grain filling was also reduced by elevated [CO2] under dry conditions [32]. The CO2 fertilization effect was also significantly reduced by growth at elevated temperatures in FACE experiments, again suggesting that high atmospheric [CO2] may not offset the negative impacts of global warming [29]. Thus, it may be that, to date, elevated [CO2] and the resultant climate changes have had net positive effects on agroecosystem productivity, but as climate change intensifies, there will be a shift towards net negative effects as has been suggested for natural ecosystems [3]." Our summary statement on the Ainsworth review is accurate regarding the CO2 effect. They raise the question of compound effects from simultaneous changes in CO2 and temperature. That topic is taken up in the discussion of the NBER study and Section 9.3

9	107	1st para.	Another study that should be cited is Hultgren et al, 2025 (10.1038/s41586-025-09085-w). "For all crops except rice, we estimate that warming will likely reduce global yields by 2050 (probability of loss ranges from 0.701 (sorghum) to 0.946 (wheat)... " "We estimate that global production declines 5.5×10^{14} kcal annually per 1 °C global mean surface temperature (GMST) rise (120 kcal per person per day or 4.4% of recommended consumption per 1 °C; $P < 0.001$). We project that adaptation and income growth alleviate 23% of global losses in 2050 and 34% at the end of the century (6% and 12%, respectively; moderate-emissions scenario), but substantial residual losses remain for all staples except rice." Regions with moderate average temperatures tend to suffer the largest yield losses. "Adjusting for CO2 fertilization does not qualitatively alter the structure of our findings ... but it does reduce the central estimate for end-of-century yield losses by 5.0– 9.5 percentage points... and increases the likelihood of positive aggregate effects." The Hultgren study came out after our draft had been complete. The headline results which generated massive publicity were based on RCP8.5 with no CO2 fertilization. One of our other reviewers wondered why we focused so much on the deficiencies of RCP8.5 when everyone knows it's a marginal case – this study is a good illustration of why. See Figure 3 in Hultgren.
9	108	1st	Reference to Ziska paper greatly mischaracterizes it. Ziska clearly indicates an effect of eCO2 on nutritional quality, but he indicates there is uncertainty in some of the mechanisms behind that response, including the simple dilution hypothesis. He states up front: "However, it is the direct effect of rising [CO2] on plant chemistry and stoichiometry that represents a continuing threat to the nutritional integrity of both human and animal systems." Ziska doesn't dismiss CO2, but he points out that nutrient dilution has also been observed under historical conditions in which CO2 was likely not the driver. Sentence rephrased "as is the evidence that nutrient dilution observed to date is entirely attributable to higher CO₂"
9	108	9.4, para. 1	Evidence for nutritional decline under eCO2 is widespread: Toreti et al, 2020 10.1038/s43016-020-00195-4) "A meta-analysis of 228 pairs of experimental observations on barley, potato, rice and wheat reported reductions in protein concentrations ranging on average from –15.3% to –9.8% under eCO2, while the reduction was relatively small (–1.4%) in soybean." AND Ainsworth et al 2025: "The positive 'CO2 fertilization' effect on crop yield is complicated by a decrease in many nutrients in elevated [CO2]. An analysis of 130 varieties of plants found that elevated [CO2] decreased the concentration of 25 important minerals by 8% on average, and the carbohydrate to mineral ratio was increased in these plants." We don't dispute any of this; it corresponds with what we say.
9	109		URL for Taylor and Schlenker paper is incorrect. It should be https://www.nber.org/papers/w29320. "papers" not "paper. Was this report peer reviewed? I cannot find it in a peer-reviewed journal. Thanks for the correction. We don't think it has appeared in print anywhere other than the NBER series.

12	129	This chapter is highly distressing, but I suppose it encapsulates the whole thesis of the document. Apparently, there is no point in policies to reduce emissions (or make the necessary changes in energy policy to accomplish emission reductions) because it will make no difference to the atmospheric CO2 concentration or climate. So why bother? Would you have said this in 1970 (CO2= 326), 1990 (CO2 = 354 ppm), or 2010 (CO2=390)? Probably so. And in 30 years when CO2 is 500 ppm, will it be fair to look back and evaluate your apparent call for inaction in the statement here "And even if global emissions were to stop tomorrow, it would take decades or centuries to see a meaningful reduction in the global CO2 concentration and hence human influences on the climate." But I suppose this attitude is justified if there is no adverse consequence and the only important effect of rising CO2 is to make little plants in greenhouse grow bigger (e.g., Fig. 2.3), and indirect effects on heat stress, drought, fires, sea level, etc. aren't worth discussing. The chapter rehearses some straightforward quantitative aspects of mitigation without making any policy recommendations. The reviewer is calling attention to actual problems finding mitigation strategies with positive net benefits.
----	-----	--

Ch	Page	para	Comment or Suggested Edit
1	2	full text	This chapter points out that the primary concern around human emissions of CO2 is that it changes the radiative balance of the atmosphere. The chapter also makes the points that CO2 has no toxicological effects on humans at current atmospheric levels, and that CO2 is necessary for photosynthesis, with the potential to stimulate plant growth at higher concentrations. These points are well-established scientific facts. Yes and experts know them but non-experts aren't necessarily aware of them.
2	3	3	It would be more reflective of the literature to say here that "Many studies over the past decade have confirmed a global greening pattern (increase in LAI) attributable to rising CO2 levels, changes in climate, changes in nitrogen deposition, land cover change, and other factors." We have added "in part" to sentence.
2	3	3	While the Zhu et al. 2016 study did find that 70.1% (+/- 29.4%) of the integrated global change in LAI was attributable to changes in CO2, most of the observed change in LAI is concentrated in the tropical forest regions of South America, Africa, and Indonesia, as shown in this report's Figure 2.1, reproduced from Zhu et al. In terms of the fraction of global land area influenced most by the factors considered in Zhu et al. 2016, effects on LAI from changing climate is the dominant factor (positive effects for 28.4% of land area plus negative effects on 4.7%, for a total area with dominant climate influence of 33.1%), followed by other factors not represented explicitly in the study or in the models (positive effects on LAI from other factors over 25.0% of land area plus negative effects over 5.3%, for a total area with other factors as the dominant effect of 30.3%), and then CO2 effects (23.2% of land area dominated by positive effects and 0.1% with negative effects, for a total of 23.4%). Since the report is focused on the U.S. it would be helpful to indicate the global context for the numbers reported. We have added new text "Other contributors included land-use changes, warming and nitrogen. The fraction attributable to CO2 was largest in the tropics; other factors played more dominant roles in CONUS."
2	3	3	The dominant factors related to changes in LAI over the U.S. (including Alaska) are land cover change (+LCC), climate effects (+CLI), other factors (+OF and -OF), and then CO2 (+CO2). There are more extensive regions where +CO2 is the dominant factor for the boreal forest zone in Canada. Given that, and given the explicit focus of the report on the U.S., it would be useful to call out in this section that the global greening pattern has distinct geographic variation in driving factors, and that over the target geography of the U.S. it seems to be dominated by factors other than increasing CO2. See my powerpoint slide 1 for a zoom on the area of interest from the Zhu et al. 2016 paper. Addressed with new sentence: CO2 fertilization effects are influenced by local temperature and nutrient and water availability, all of which vary regionally.
2	3	4	"Zheng et al. (2017) confirmed the pattern..." should be modified to say "Zhen et al. (2017) confirmed the pattern of observed greening..." As written, and in the context of the previous paragraph, the current text suggests that Zheng et al. 2017 confirmed the pattern of greening being related mainly to increased CO2, a factor which was not examined in their study. Changed: confirmed the pattern of greening, noting that over thirty years it had added 8 percent...

2	3	4	Without the addition of the appropriate context in the preceeding paragraph (my notes 3, 4, and 5) the remainder of this paragraph could be misinterpreted to mean that the impacts of greening on air temperature are attributable back to a positive effect of CO2 on greening. Rewording has addressed this.
2	3	4	The sentence "Greening has been observed globally but Chen et al. (2019) noted that China and India were exploiting it through land management changes" is misleading. Chen et al. (2019) shows that China and India are <i>causing</i> the observed greening in large areas by intentionally increasing the land area occupied by forests (China) and increases in harvested area in croplands, mainly due to multi-cropping, heavy fertilizer use, and expanded irrigation (China and India). It would be more accurate to say "Greening has been observed globally, but Chen et al. (2019) represent a disproportionate fraction of the total greening trend, accomplished through intentional increases in forest area (China), and expansion of multi-cropping, fertilizer use, and irrigation in croplands (China and India)." Changed: "Greening has been observed globally. Chen et al. (2019) show that in China and India much of it is driven by land management changes"
2	3	3 and 4	Given the changes suggested in these two paragraphs, it raises the question of whether the section title (CO2 and global greening) is itself misleading. That title wrongly suggests that all the content to follow is reflective of a direct influence of CO2 on the observed global greening trends, when the literature presents a much more <i>nuanced</i> interpretation. Title changed to CO2 as a contributor to global greening
2	3	3 and 4	It would be worth noting in this section that the multiple remote sensing-based datasets for LAI changes have remarkable differences, especially when comparing the figure 2.1 reproduced from Zhu et al. 2016 with the MODIS-based data record from Chen et al. 2019 (their figure 1). That means it is difficult to place a lot of confidence in the attribution of changes in different regions to different factors. See my powerpoint slide 2 for a comparison of the four datasets used in Zhu et al. 2016 and Chen et al. 2019. Thank you for this information. It is an interesting point but gets into more specialized detail than is necessary for this report.
2	3	5	The authorship for the Haverd et al. 2020 citation is not correct in the References section for this chapter. The correct citation is: Haverd, V., B. Smith, J. G. Canadell, M. Cuntz, S. Mikaloff-Fletcher, G. Farquhar, W. Woodgate, P. R. Briggs and C. M. Trudinger 2020. Higher than expected CO2 fertilization inferred from leaf to global observations. Global Change Biology 26(4): 2390-2402 DOI: https://doi.org/10.1111/gcb.14950 . Corrected
2	3	5	A more recent and more comprehensive study (Keenan et al. 2023) reexamined multiple data constraints and concluded that the model used in Haverd et al. 2020 (CABLE) is outside the likely range of CO2 fertilization effects, with higher CO2 fertilization than indicated by multiple independent constraints. At the very least this more recent paper should be cited in the report, with text indicating that the central estimate from the TRENDY models is more likely to be in the range of observational constraints than is the CABLE result. As it stands the report suggests that the latest science indicates that most models have underestimated the fertilization effect, and the literature doesn't currently support that conclusion. See: Keenan, T. F., X. Luo, B. D. Stocker, M. G. De Kauwe, B. E. Medlyn, I. C. Prentice, N. G. Smith, C. Terrer, H. Wang, Y. Zhang and S. Zhou 2023. A constraint on historic growth in global photosynthesis due to rising CO2. Nature Climate Change 13(12): 1376-1381 DOI: 10.1038/s41558-023-01867-2. Added sentence: However Keenan et al (2023) estimated a lower fertilization rate more in line with models.

2	4	1	The attribution analysis in the Chen et al. 2024 paper is very sensitive to the choice of multiple regression vs. partial correlation (their figures 3 vs S7, respectively), and in both cases they seem to misattribute the significant increases in LAI in India and China to CO2 rather than to changes in landcover and cropping practices. This kind of regression-based attribution is less informative than the model-based inference used for example by Zhu et al. 2016. The description of sensor calibration issues in this paper is also very cursory. It would probably be better to refer to the review paper of Piao et al. 2020 to support the claim of continued greening. Piao, S., X. Wang, T. Park, C. Chen, X. Lian, Y. He, J. W. Bjerke, A. Chen, P. Ciais, H. Tømmervik, R. R. Nemani and R. B. Myneni 2020. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. Nature Reviews Earth & Environment 1(1): 14-27 DOI: 10.1038/s43017-019-0001-x. Thank you for the comment. We have taken out the details about the Chen et al. analysis and say simply “Piao et al. (2020) and Chen et al. (2024) report that the greening trend continues with no evidence of slowdown, and CO2 fertilization remains the dominant driver”
2	4	2	The section 2.1.2 (Photosynthesis and CO2 levels) lacks coherence. It seems to be a collection of uncontroversial points about the ability of increased CO2 concentration to stimulate plant growth and reduce water loss through stomates. Figure 2.2 seems intended to show that the current levels of CO2 are not high compared to levels experienced in Earth's deep geologic past. A balanced treatment of the topic might call out the rate of change in CO2 concentration from human-caused emissions, and how both that rate and the absolute levels diverge radically from rates of change and ranges of variability over the past hundreds, thousands, and hundreds of thousands of years. See my powerpoint slide 3 for an example set of figures that might be included. In response to another reviewer, we have added the sentence “While the modern rate of change in CO2 is likely high compared to all prior intervals, the geological evidence is that plants and animals evolved under much higher CO2 levels than at present.”
2	7	4	The report suggests that the topics of CO2 fertilization and increased water use efficiency are not adequately treated in recent IPCC reports. In IPCC's AR6 WG I report there is an entire chapter devoted to an assessment of carbon cycle processes (Chapter 5, Global Carbon and Other Biogeochemical Cycles and Feedbacks). This is precisely where one would expect to find information about CO2 fertilization and water use efficiency. In the Executive Summary for the chapter is the following bolded headline: Increases in atmospheric CO2 lead to increases in land carbon storage through CO2 fertilization of photosynthesis and increased water use efficiency (high confidence). The associated Executive Summary text includes reference to two figures, three chapter sections, and a cross-chapter box all dealing directly with this topic. The Executive Summary text also references the important topic of nutrient dynamics and their interactions with fertilization and ecosystem-climate feedbacks, a critical nuance of the interaction of CO2 and vegetation productivity that is ignored in the report reviewed here. We acknowledge that the topic is addressed in the body of IPCC reports. But we draw attention to its omission from summary documents.

2	8	2	Section 2.2.2 (Coral reef changes) has a strong focus on past examples of early investigations that are later updated. There is also a note about the difficulty of publishing negative results, with a quote that this pattern "is true across all of science". Given the objective of this report, I suggest a shift in tone away from complaints about the kinds of papers that do and don't receive media attention, and instead highlight the latest synthesis of results about the likely future of coral reefs. A relatively recent synthesis paper (Cornwall et al. 2021) in a well-respected journal (PNAS) based on collated data from 233 locations worldwide projects that 37% of reefs will stop accreting and thus fail to keep up with sea level rise by 2050 under the low emissions RCP2.6 scenario, and no reefs would be able to accrete at a rate to stay ahead of sea level rise by 2100 under either RCP4.5 or RCP8.5. This analysis finds that most of the loss of net accretion rate is due to bleaching events, and a minority of the impacts are due to "direct physiological impacts of ocean warming and acidification on calcification or bioerosion". C.E. Cornwall, S. Comeau, N.A. Kornder, C.T. Perry, R. van Hooidek, T.M. DeCarlo, M.S. Pratchett, K.D. Anderson, N. Browne, R. Carpenter, G. Diaz-Pulido, J.P. D'Olivo, S.S. Doo, J. Figueiredo, S.A.V. Fortunato, E. Kennedy, C.A. Lantz, M.T. McCulloch, M. González-Rivero, [...] & R.J. Lowe, Global declines in coral reef calcium carbonate production under ocean acidification and warming, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 118 (21) e2015265118, https://doi.org/10.1073/pnas.2015265118 (2021). This is a model projection study whereas for the very limited purpose of this section we are focusing on current and historical observations.
3	14	1	The study by Connolly et al. 2021 uses a linear regression approach to estimate the amount of variability in surface temperature trends that could be explained by total solar irradiance time series. Their approach is to first model the temperature trend with TSI as the dependent variable, and then compare the residuals from that fit to anthropogenic forcing factors. This is an obviously biased approach, and in fact a full paper was published the following year (in the same journal) laying out the erroneous methods and the faulty conclusions they produce (Richardson and Benestad 2022). Richardson, M. T. and R. E. Benestad 2022. Erroneous use of Statistics behind Claims of a Major Solar Role in Recent Warming. Research in Astronomy and Astrophysics 22(12): 125008 DOI: 10.1088/1674-4527/ac981c. While we agree with R&B that a partial regression is biased unless the regressors are orthogonal, Connolly et al. replied in 2023 at https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4527/acf18e in which they used updated AR6 data and reproduced their main result using multiple regression. However they also emphasized that it is only one of many possible results depending on choice of solar proxy and surface T record.
3	18	1	Section 3.2.2 (The carbon cycle relating emissions and concentrations). There is no new information or analysis presented in the chapter, and it relies heavily on Global Carbon Project information. Figure 3.2.3 is described as showing a seven-fold difference in the recent trend in land carbon sink estimates across land models, and this is given as a potential driver of uncertainty in future carbon cycle and climate change predictions. Variation among models is well known and is one of the reasons exercises like CMIP and GCP rely on multi-model ensembles when assessing the state of the science. The distribution of results looks fairly typical in this diagram, with a strong central value around 1.3 to 1.3. We're not claiming to have added new information, just reviewing what's out there.

12	129	3	The following sentence is misleading: "And even if global emissions were to stop tomorrow, it would take decades or centuries to see a meaningful reduction in the global CO2 concentration and hence human influences on the climate." It is true that bringing global emissions immediately to zero would not reduce CO2 concentrations on short timescales. It is not true that this same scenario means no reduction in human influence on the climate. We must compare the zero emissions scenario to something, and the most meaningful comparison is the current trajectory of increasing emissions and the resulting super-linear increase in concentration. So by reducing emissions to zero we clearly avoid the expected increases in concentration and the expected increases in radiative forcing together with increased near surface air temperature and all the other expected consequences. So our change in action - going to zero emissions - does in fact have an immediate and growing human influence on the trajectory of the climate system. That is not an argument for reducing our emissions to zero tomorrow, it is just an argument for logic and clarity in how we talk about consequences of different actions. The sentence in the text is correct. It's also true to say that going to zero emissions would, over time, open up a widening gap between observed and counterfactual. But realistically we are only looking at marginal changes. The stock-flow mismatch is one reason IAMs have not recommended going to zero emissions.
12	129	5	Regarding the sentence "The practice of referring to unilateral U.S. reductions as "combatting climate change" or "taking action on climate" therefore reflects a profound misunderstanding of the scale of the issue." This makes the dubious assumption that when people refer to "combating climate change" or "taking action on climate" they are ignorant of the scale of the problem. Instead, it is probably more justifiable to assume that it is well-understood by most people who advocate for these local and national changes that the major emitters must act together to make a big difference in global emissions. It is at least worth considering, in the context of this report, that a path toward action at the necessary scale will require local and national action from a broad consortium, and that individual advocacy is a useful and necessary starting point for shifting the inertia of global policies. Sentence modified to read "The practice of referring to unilateral U.S. reductions as "combatting climate change" or "taking action on climate" on the assumption we can stop climate change therefore reflects a profound misunderstanding"

REVIEWER #6

ch	pg	para	Comment or Suggested Edit
Overarching	Overarching	Overarching	• I would like to thank the authors for the opportunity to provide comment on this report. Providing decision-makers with information about the impacts of carbon dioxide emissions on the U.S. climate is critical as they face consequential decisions about the future of energy, agricultural, and environmental policy. Assessments of the science such as IPCC reports and the NCA benefit from undergoing robust review including expert review, public review, and government review with review comments and responses made publicly available. Similarly, important government reports and regulations undergo inter-agency review and are published in the Federal Register for a full notice and comment process and publish a public response to comment. While these processes are far from perfect, they offer the opportunity for improvement and help lend authority to the final products, and I highly encourage you to undertake a similar robust and open peer review process for this report to enhance the report’s credibility in the eyes of decision-makers and the public.
Executive Summary	viii	1	• There is a disconnect between the stated intent of the report by the authors in the preface, “whether carbon dioxide emissions endanger the U.S. public,” and this executive summary, as well as the organization of the report. Would suggest aligning by either reframing the focus in the preface to better match the organization of the report, or better aligning the report organization with the stated focus. Preface has been reworted and the statement eliminated. We have also changed the title to clarify this
Preface	ix	3	• “While the report is intended to be accessible to non-experts, we have omitted some introductory or explanatory material that can easily be accessed elsewhere. Nor have we attempted to survey entire literatures related to the topics covered.” • While this approach is understandable given the time constraints this report was produced under, given the level of visibility this report will have, it potentially opens up the report to criticism of being misleading by omission – focusing on areas where the authors disagree with the broader scientific literature and omitting areas large areas that are known about climate where there is less disagreement. See our response to the previous comment and revisions to paragraph 2.
Preface	ix	3	• “We have focused as much as possible on literature published since 2020 and referenced previous IPCC and NCA assessment reports. We have also used data through 2024 where possible.” • This is a good approach for this report; however, much of the literature cited is from pre-2020, and many of the references to IPCC and NCA reports are to older reports (e.g. NCA 4 and IPCC AR 4&5) instead of NCA 5 and IPCC reports from the 6th assessment cycle. In these sections that heavily cite this older literature, it is not clear if the newer literature does not address these points or if the issues raised in the older literature are resolved or significantly changed in the newer literature. We have included reference to previous assessment reports where the analysis is insightful and not superseded by later reports. We note that we regard NCA4 as far more credible than NCA5

Preface	ix	3	• The IPCC’s mandate is to assess the scientific literature comprehensively, including a range of views, and report disagreements. This report has a tendency to selectively quote the IPCC focusing on disagreements and excluding areas where scientists agree. This approach risks giving a misleading picture of the state of the science through omission. A possible way to address this is to have a section summarizing areas of agreement by pointing to all statements of fact and high confidence statements from IPCC AR6 before digging into the more controversial areas with disagreement. This could be a short discussion about areas of agreement up front before explaining the focus of this report on these areas of disagreement, with the IPCC statements of fact and high confidence statements included in an appendix. • The report also includes only a very small subset of the literature since 2020. The authors should describe the approach to how they selected the literature included, and if possible, point to any systematic ways excluded literature could lead to different conclusions. • It is also notable that there a fair amount of new analysis in this report done by the authors that has not yet been peer reviewed. It would be good to flag these spots with a note about why these are needed while other related peer reviewed articles are excluded. This is addressed to some extent in the revised Preface
1	2	1	• If the goal of this report is to discuss links between CO2 and climate, this is an odd way to begin the report with a focus on differences between CO2 and criteria air pollutants. It clears up a confusion of language that persists
1	2	1	• “It is an issue of concern because of its potential effects on the global climate, a complex issue that occupies much of this report.” Suggest deleting the word potential as the existence of the effect is not disputed. Deleted: “potential”
1	2	4	• “But the primary concern about CO2 is its role as a greenhouse gas (GHG) that alters the earth’s energy balance.” Would add “warming the planet” to the end of this sentence as the qualitative effect is not debated and the concern is not about the energy balance itself but about the warming effects of the imbalance. Added: “warming the planet”
2	3	1	• “The recent decline in pH is within the range of natural variability on millennial time scales. Most ocean life evolved when the oceans were mildly acidic. Decreasing pH might adversely affect corals, although the Australian Great Barrier Reef has shown considerable growth in recent years.” • Note that the IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC) finds that pH decline has very likely emerged from natural variability. SROCC SPM A.2.5, “Open ocean surface pH has declined by a very likely range of 0.017–0.027 pH units per decade since the late 1980s, with the decline in surface ocean pH very likely to have already emerged from background natural variability for more than 95% of the ocean surface area.” We have left this out since it relates to attribution, which is beyond the scope of what we are addressing in this chapter
3	15	3	• “Instead, the IPCC has created various sets of scenarios meant to span a plausible range of possibilities” • Suggest changing “created” to “assessed” as the scenarios are created by the science community not the IPCC. We have changed the wording to “used”
3	16	4	• “The IEA trends, which are based on plausible extrapolations of current economic and demographic trends, run below the entire envelope of RCP projections, implying not only that RCP8.5 is dubious, but that even lower emission scenarios are unlikely.” • Burgess compares IEA to the two highest SSP-RCP scenarios, not to the full range. The last sentence of the paragraph is incorrect – the range in Burgess is only no climate policies which doesn’t include the lower RCPs. We find the labeling on the Burgess diagram unclear and hard to understand. The text has been revised and we added a reference to Pielke Jr et al 2022 which has a better presentation.

3	17	2	• “As of 2023, global CO2 emissions have been tracking well below SSP7.0 and are even below SSP2-4.5.” • Note that near-term emissions are not necessarily a good predictor of long-term emissions, as the latter will depend on changes in population, demographics, technology, and policy that do not have the same influence on near-term emissions. Noted
3	22	6	• “In summary, while there is clearly warming in the land record, there is also evidence that it is biased upward by patterns of urbanization and that these biases have not been completely removed by the data processing algorithms used to produce climate data sets.” • Quantitative info would be helpful here. How large is the warming? How large might the bias be? This is a topic that needs revisiting. The quantitative estimates are 15+ years old
4	26	1	• The Chapter Summary doesn’t really capture the full tax of the chapter. Would suggest: Defining ECS/TCS, reporting values for ECS and uncertainties/methods, then reporting values for TCS, preferably with a sentence on what those values imply The terms are defined in the chapter
4	26	2	• “This raising of the lower bound is less justified; evidence since the AR6 finds the lower bound of the likely range to be around 1.8°C.” • This isn’t really discussed comprehensively in the chapter. It is discussed, in context of Nic Lewis’ research
4	26	3	• “The climate’s response to increasing concentrations of CO2 is central to the scientific debate on anthropogenic climate change” • Suggest rewording this to, “The magnitude of the climate’s response...” As currently worded it could be a bit misleading since the qualitative effect (i.e. increasing CO2 concentrations lead to increases in global average temperature) is not disputed – the uncertainty is around the magnitude of the effect. Reworded
4	26	6	• The text sites Dayaratna (2016), but this should be a reference to Dayaratna (2017) as listed in the reference section. Fixed
4	26	6	• “If ECS is very high (above 4.5°C) immediate aggressive emission controls become more imperative, whereas no CO2 emission controls are economically justifiable for ECS below 2.0°C (Dayaratna et al. 2016, 2020).” • This could use additional clarification as there are low and now carbon technologies that can be economically justified based on cost of energy alone, depending on technology, location, etc. In the absence of specific source citations we have left the text as is. We are not aware of new low or no carbon technologies that are affordable and scalable. Likewise, if energy conservation pays for the low carbon tech people would have been adopting them already.

4	26	6	• “Obtaining a precise estimate is impossible, so policy making needs to account for the uncertainty.” • The Social Cost of CO2 (SC-CO2) as used by the USG in regulatory impact analyses has always accounted for uncertainties in the ECS. EPA (2016) used a probability distribution for the ECS calibrated to IPCC AR4 findings (the most recent values available at the time) to harmonize the approach for the three models used (FUND, DICE, and PAGE). EPA (2023) updated the SC-CO2 in response to NAS recommendations (NAS 2017) to include a much fuller representation of the uncertainties in both ECS and TCR, and utilized a modular approach incorporating the Finite amplitude Impulse Response (FaIR) climate model, a reduced complexity climate model, with ECS and TCR distributions calibrated to IPCC AR6 to represent this uncertainty. • The Dayaratna (2017 & 2020) papers referenced here analyze sensitivity of a subset of the older models used in EPA (2016) to just ECS estimates. It would be helpful to address the advances in the broader literature that are discussed and represented in EPA (2023) as the focus of this report is on literature published since 2020. • EPA (2016) “Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866 Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases, United States Government.” https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-12/documents/sc_co2_tsd_august_2016.pdf • EPA (2023) “Supplementary Material for the Regulatory Impact Analysis for the Final Rulemaking, ‘Standards of Performance for New, Reconstructed, and Modified Sources and Emissions Guidelines for Existing Sources: Oil and Natural Gas Sector Climate Review’ – EPA Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances.” Docket ID No. EPA-HQ-OAR-2021-0317. https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-12/epa_scghg_2023_report_final.pdf • NAS (2017) “Valuing Climate Damages. Updating Estimation of the Social Cost of Carbon Dioxide” https://nap.nationalacademies.org/catalog/24651/valuing-climate-damages-updating-estimation-of-the-social-cost-of Most of the topics are touched upon in Ch 11. The newer EPA approach (e.g. the FaIR model) don’t reflect a fundamentally different approach than before. Will discuss below.
4	28	2	• “Because of concerns about model tuning and the high sensitivity to cloud parameterizations, the IPCC AR6 (2021) did not rely on climate model simulations in their assessment of climate sensitivity, relying instead on data-driven methods.” • AR6 WGI 7.5.5 states this a little differently. IPCC’s assessment wasn’t “directly informed” but “ESMs remain essential tools.” Our statement is ok as is
4	29	3	• “For AR6, the IPCC placed primary weight on the results of Sherwood et al. (2020)...” • The IPCC assessed a large number of studies, not just Sherwood (2020). Our statement is ok as is. Sherwood et al was predominantly relied upon
5	32	1	• It would be helpful for the reader for this chapter to start with a summary figure (e.g. like IPCC AR6 WG1 – SPM.1 or Fig. 3.4). Currently, the chapter jumps right into details that will be difficult for anyone who is not a climate scientist or already versed in these issues to understand or interpret. Too late in the process to add a new figure
5	33	Figure	• “Figure 5.1 CMIP6 Average surface temperature range across 33 models and standard deviation using SSP5-85 scenario.” • SSP5-85 is an excessively high scenario that is not representative of current expectations of emissions projections. Suggest changing the figure for on with data from a less misleading and more representative scenario. The use of RCP8.5 doesnt make much difference given high spread for historical period, but we agree this should be changed for a subsequent version of the Report

5	34	1	• There have been extensive published comments and responses on the approach used in Scafetta (2023). Can these be reflected here? • G.A. Schmidt, G.S. Jones, and J.J. Kennedy, "Comment on "Advanced Testing of Low, Medium, and High ECS CMIP6 GCM Simulations Versus ERA5-T2m" by N. Scafetta (2022)", Geophysical Research Letters, vol. 50, 2023. http://dx.doi.org/10.1029/2022GL102530 • N. Scafetta, "Reply to "Comment on 'Advanced Testing of Low, Medium, and High ECS CMIP6 GCM Simulations Versus ERA5-T2m' by N. Scafetta (2022)" by Schmidt et al. (2023)", Geophysical Research Letters, vol. 50, 2023. http://dx.doi.org/10.1029/2023GL104960 • Z. Hausfather, K. Marvel, G.A. Schmidt, J.W. Nielsen-Gammon, and M. Zelinka, "Climate simulations: recognize the 'hot model' problem", Nature, vol. 605, pp. 26-29, 2022. http://dx.doi.org/10.1038/d41586-022-01192-2 • S. Jain, A.A. Scaife, T.G. Shepherd, C. Deser, N. Dunstone, G.A. Schmidt, K.E. Trenberth, and T. Turkington, "Importance of internal variability for climate model assessment", npj Climate and Atmospheric Science, vol. 6, 2023. http://dx.doi.org/10.1038/s41612-023-00389-0 The Schmidt et al paper is a comment on a different paper of Scafetta's and focuses on his t-statistic, which isn't pertinent to the paper we cite (from Climate Dynamics). Regarding the Jain et al paper, Scafetta uses ensemble ranges within each ECS type and doesn't simply rule models out but shows that some perform well for TAS. Relevance of the Hausfather et al paper is not clear.
5	34	4	• "Spencer (2024) has also provided a useful summary of the Model-Observation mismatch by comparing trends in surface temperature data products with those in individual climate models, as summarized in Figure 5.3; most climate models show substantially more warming than the observations since 1979." • It is worth noting that IPCC projected temperatures do not use all models and instead focus on those that best reproduce observations. So while some models may show warmer or cooler temperatures than observations, that does not imply that projections from large assessments reflect those biases. Our text speaks to the collection of CMIP6 climate models; some of those with the largest amount of warming are widely used models from the US and UK
5	37	3	• "Hence, we assess with medium confidence that CMIP5 and CMIP6 models continue to overestimate observed warming in the upper tropical troposphere over the 1979–2014 period by at least 0.1°C per decade," • "Notably, despite the accumulation of evidence of excess model warming the IPCC assigns only medium confidence to the existence of a warming bias." • This reflects a more general issue with IPCC confidence statements where the inclusion of a quantification reduces the confidence they include. Here the full statement with the quantification of 0.1C per decade is assigned medium confidence whereas a statement about the existence of the bias without a specific quantification would receive higher confidence. Noted
5	39	Figure 5.7	• Does this update with data through 2024 use the same models that Christy and McNider (2017) used, or does it use updated versions for the models as well? This would be helpful to clarify here and in other places where figures are produced with updated data. Excellent catch. Fig. 5.7 uses CMIP-6 models, this will be stated in the caption as an update of Christy and McNider with CMIP6 output.
5	39	3	• "The IPCC AR6 did not assess this issue." • Was this assessed in IPCC AR5? Many of the citations here could have been assessed then. Is there any more recent evidence on these issues that should be referenced here? IPCC has never addressed this issue with rigor, but does reluctantly note the discrepancy.
5	40	1	• Are there more recent papers or data available? All the info here is AR6 or pre-AR6, but more recent years have shown more surface warming. It would be interesting to show stratospheric temperatures for these more recent years as well to see how this relationship holds. Santer et al. (2023) has been added.

5	40	5	• Trends in snow cover depend on both changes in precipitation and changes in temperature. It would be helpful if these were discussed separately rather than showing the net effect for one region/season. Context for statement is that the models get it wrong
6	47	1	• This chapter relies solely on observations and does not include other lines of evidence, it would be helpful to discuss what these other lines of evidence indicate to avoid introducing potential biases (e.g. what do process based lines of evidence show?) Yes we rely primarily on observations. We have added some text regarded process-based analyses, notably in the section on hurricanes
6	47	1	• The chapter summary does not fully capture the chapter or the science. Suggest talking about the extremes affected by climate, the extremes not affected by climate, and those where the data isn't sufficient to establish a trend. We think our summary is appropriate
6	47	3	• “Over geologic time the climate system has generated an (essentially) infinite variety of weather patterns and extremes...” • Just because an event occurred before humans does not mean humans are not influencing the frequency or intensity of such events now. Additionally, if something has happened in the geologic record, but humans have never experienced it before, they may not be prepared for such an event. Changes in frequency or intensity are precisely the issues discussed. Adaptation to extreme weather is a separate but important issue
6	50	Figure	• The figure heading has “@RyanMaue” in the title. Looks odd to have a social media handle in the figure. Is the source peer reviewed? We have added reference to an older publication by Maue that describes the analysis
6	52	4	• Insufficient data is different than no effects. It would be helpful to be clear in instances like this whether a conclusion is because the data supports it, or because there is insufficient data to say the opposite. This is covered in the last para of the section
6	53	Table	• Could you also show a similar table with hurricane precipitation? It is hard to get historical rainfall going very far back
6	53	5	• The last two paragraphs show findings from NCA4. With the interest in focusing on recent literature, what does NCA5 say about these issues? Does it not cover this issue, does it say the same thing, does it contradict this finding? NCA5 statements are discussed in the body of the text, see pp 57ff.
6	54	1	• The heading of section 6.3.1 is a bit misleading as this is partly driven by warmer winters and fewer cold days. For the CONUS, the heading is accurate as demonstrated with observational analyses
6	58	Figure	• Figure 6.3.5 shows the number of days greater than or equal to 95F in 6-year periods. Why show this in 6-year periods? That seems like an unusual choice. Would this look different with 5, 10, or 15 year periods? The time series is 126 years long, which is evenly divisible by 6. The point is to compress the depiction of interannual (i.e. natural) variability and examine slower changes. In our decimal system, 5 or 10 years is more commonly used, but with 126 years of data, we did not want to leave an “orphan” column (one with fewer years) compared with the entire time series. This is explained in the figure caption.
6	58	4	• “We measure “Heatwave Days” here as the count of all days in May-Sep each year that exceed the 90th percentile for that day and that lie within a period of at least six consecutive days.” • Why six consecutive days? Would this look different for 5 days, a week, 10 days? Six days seems like an unusual period to pick. As noted in the text we use a metric defined in NCA4 for heat wave days. Regardless, whatever parametric choice is made (i.e. 5 days, 10 days, 85th percentile, etc.) the 1920s to early 1950s dominate the occurrence of heat wave days. Added: The pattern of results show below does not depend on the choice of reference period.)”

6	58	4	• The dependence on and subsequent choice of reference periods is worrying. Can multiple reference periods be shown to show the dependence? There will be no change in the fundamental result no matter which reference period is chosen. If the entire period-of-record is used to calculate percentiles, there will be fewer percentile exceedences than if a cold reference period is chosen (as was done in NCA4). However, the shape of the outcome will be the same.
6	59	3	• “The NCA5 directs readers to the website https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves (USGCRP 2023)” • Broken link. The link was live when the report was written, but the Reviewer is correct that it is now broken. Fortunately, we included the figure from that link to demonstrate the unusual start date (1961) and the fact that the sample contained only large cities.
6	61	3 to 6	• This reads as a very selective analysis. With a very tight time constraint and the fact our analysis required the construction of serially complete datasets, we selected regions that were called out by NCA5 and/or the IPCC AR6 as unusual. In future versions we will have data for more regions (e.g. upper Midwest, Central Plains, Texas Hill Country).
6	67	2	• Is this section suggesting that climate change is causing the decrease in tornadoes? No, this section doesn’t engage in attribution
6	68	7	• This is another place where it would be better to reference newer literature and NCA5 instead of relying on NCA4. What has changed since then? NCA5 mentions drought many times, but in anecdotal ways without metrics for testing. For example, NCA5 pg 1-23 states. <i>“Between 1980 and 2022, drought and related heatwaves caused approximately \$328 Billion in damages (in 2022 dollars). Recent droughts have strained surface water and groundwater supplies, reduced agricultural productivity, and lowered water levels in major reservoirs, threatening hydropower generation.”</i> This statement simply says that the demand for water was not met by the human-built systems which manage water supplies – there is no metric here that measures a change in the natural water supply. The statements on which we focus relate to whether the supply has been changing – a metric related to the climate system.
6	69	1	• Figure 6.7.1, is this the same indicator used in AR6? We have clarified the text to refer to meteorological drought. AR6 speaks mostly of “Agricultural and Ecological Droughts” which are defined in for various regions as <i>“Agricultural and ecological droughts are assessed based on observed and simulated changes in total column soil moisture, complemented by evidence on changes in surface soil moisture, water balance (precipitation minus evapotranspiration) and indices driven by precipitation and atmospheric evaporative demand”</i>, so we are unsure what specific metric is referenced.” Elsewhere it simply uses the term “drought” or “Meteorological and Hydrological Drought.” AR6 pg 1075 “A drought is a period of abnormally dry weather that persists for long enough to cause a serious hydrological imbalance (Glossary; Wilhite and Glantz, 1985; Wilhite, 2000; Cook et al., 2018). Most droughts begin as persistent precipitation deficits (‘meteorological drought’) that propagate over time into deficits in soil moisture, streamflow, and water storage (Figure 8.6), leading to a reduction in water supply (‘hydrological drought’). Increased atmospheric evaporative demand increases plant water stress, leading to ‘agricultural and ecological drought’. The best we can say is the AR6 used a different metric than shown in Fig. 6.7.1 that likely varied from region to region. However, Fig. 6.7.1 has high correspondence with drought-related impacts.

6	69	3	• “In summary there is no evidence of increasing drought frequency or intensity in the U.S. or globally over recent decades.” • This statement is not supported by the citations presented here. AR6 finds that there are trends in agricultural and ecological droughts and this section does not contradict that finding, so this general statement about there being no evidence of increasing drought frequency or intensity is misleading. • AR6 SPM A.3.2 – “Human-induced climate change has contributed to increases in agricultural and ecological droughts in some regions due to increased land evapotranspiration (medium confidence).” Footnote, “Agricultural and ecological drought (depending on the affected biome): a period with abnormal soil moisture deficit, which results from combined shortage of precipitation and excess evapotranspiration, and during the growing season impinges on crop production or ecosystem function in general (see Annex VII: Glossary). Observed changes in meteorological droughts (precipitation deficits) and hydrological droughts (streamflow deficits) are distinct from those in agricultural and ecological droughts and are addressed in the underlying AR6 material (Chapter 11).” We have added “meteorological” to last sentence
6	69	4	• “The IPCC has not provided an assessment of wildfires.” • AR6 WGII SPM discusses wildfire, and WG1 SPM discusses fire weather. • AR6 WGII SPM – B.1.1, B.1.4, Fig. SPM.2, Fig. SPM.3, B.5.2, B.6.2, C.2.3, C.4.2, D.4.2, • AR6 WGI SPM – C.2.4 Restated: The IPCC has not provided an attribution analysis of wildfires
7	75	1	• “The largest sea level increases along U.S. coasts are Galveston, New Orleans, and the Chesapeake Bay regions” • How much? Are there quantifications? The figures show this
8	83	3	• “AR5 Working Group II (Cramer et al., 2014) makes the following statement:” • What does AR6 say on this topic? The science on attribution has evolved since AR5. The AR6 did not make an analogous statement, but the challenges haven’t been resolved
8	84	6	• “There are three areas of substantive criticism of the IPCC’s assessment of the causes of the recent warming...” • Are there citations that can be included here or are these criticisms attributed to the authors? The section describes this adequately
8	84	6	• “IPCC’s policy-informing...” • This phrasing is a bit odd. IPCC reports are policy relevant but policy neutral. This phrasing the direct policy in some way. Deleted policy-informing
8	90	3	• “For comparison, the IPCC estimate of forcing from the increase in atmospheric CO2 compared to preindustrial times is approximately 2.2 W/m2 (Figure 3.1.2).” • This is comparing different time periods. Figure 8.2 includes data for 2023 and 2024, IPCC wouldn’t include the most recent years since it was published in 2021. Suggest updating from the IPCC data to Forster et al. (2024) that updates these indicators. • Forster et al. (2024) “Indicators of Global Climate Change 2024: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence” https://doi.org/10.5194/essd-17-2641-2025 Updated
8	92	2	• “It is not easy to justify a new positive low cloud feedback that began emerging in 2015.” • Explain why this is not easy? Added, “since there is no obvious feedback trigger starting in 2015”

8	93	4	• “Other columns of IPCC Table 12.12 report on whether anthropogenic signals are expected to emerge this century under RCP8.5, the most extreme forcing scenario. We have omitted these columns for several reasons.” • Can this be done for RCPs other than 8.5? The point of these omitted columns in IPCC Table 12.12 was to show that for some extremes we may not see an effect now, but will in the future. As it is presented here it implies future changes won’t matter. Agree 4.5 would have been better, but this is a query that should be directed to the IPCC
9	104	1	• IPCC AR6 WGII has an assessment of agriculture (both in the SPM and in Chapter 5), and the IPCC also has a special report on Climate Change and Land, that are more comprehensive, recent, and cover a larger range of the literature than discussed here. Please update this chapter to reflect these findings. Need a more specific point of challenge. Other reviewers have brought up specific topics that were either addressed by revisions or are already covered. We think this is one area that goes under the heading of critiquing the mainstream, based on peer-reviewed literature.
10	110	4	• Section 10.1 rightly points out that technological advances have substantially reduced losses from extreme weather events. We are better at forecasting, preparing for, and adapting to extreme weather than we were in the past, and these advances all help reduce impacts. However, our ability to do this in the future depends upon preparing for future changes – we can’t simply assume adaptation will continue, we need to provide information on future risks and how those risks are impacted by climate change in order to inform continued technological advances and future adaptation. Noted
10	111	1	• “In May 2025 NOAA announced it has withdrawn the Billion Dollar Disaster product from publication (Pielke Jr., 2025).” • It would be better to cite an official government source from NOAA announcing this withdraw instead of a blog post commenting on it. Agreed, but this is the best information available from a well-published expert
10	111	2	• Losses from extreme weather and climate events are driven by climate risk (the physical events themselves), exposure to those risks (population and infrastructure impacted by these events), and adaptation to those events (technological advances in forecasting, warning systems, and resiliency). Understanding these risks requires disentangling these drivers in order to prepare for the future. Noted. Such a risk assessment is beyond the scope of this report
10	112	1	• There are additional citations that focus on the net effects of heat and cold related mortality that would be worth discussing and citing in this section. • EPA. 2024. Draft Technical Documentation for the Framework for Evaluating Damages and Impacts (FrEDI). U.S. Environmental Protection Agency, EPA 430-R-24-001. • Cromar et al., 2022. Global Health Impacts for Economic Models of Climate Change: A Systematic Review and Meta-Analysis. Ann. Am. Thorac. Soc. 19, 1203–1212. https://doi.org/10.1513/AnnalsATS.202110-1193OC • Hsiang et al., 2017. Estimating economic damage from climate change in the United States. Science 356, 1362–1369. • Mills et al., 2015. Climate change impacts on extreme temperature mortality in select metropolitan areas in the United States. Clim. Change 131, 83–95 The Cromar meta-analysis included only 7 studies for the US all published before 2015, and not all of them examined both hot and cold extremes. We think the citations we have, which includes the EPA, are adequate.
10	113	7	• Section 10.3.2 has good points about the importance of energy affordability and how energy poverty impacts adaptation behaviors. Cong et al. (2022) is another good citation for this section. • Cong, S., Nock, D., Qiu, Y.L. et al. Unveiling hidden energy poverty using the energy equity gap. Nat Commun 13, 2456 (2022). https://doi.org/10.1038/s41467-022-30146-5 Citation added

11	Chapter	Chapter	• Much of this chapter if focused on older literature on SCC and on applications that fall outside of how the USG has actually implemented SCC. This chapter would benefit from a more explicit focus on EPA (2023) as it represents the latest state of the literature on SCC, shows how the USG applies the SCC for regulatory impact analyses, shows how the USG updated the older IAG era SCC as represented in EPA (2016) in response to the recommendations in NAS (2017), shows how uncertainty is incorporated into SCC estimates, and discusses areas of the literature that are on the frontier, highly uncertain, and not ready to be incorporated into the official USG estimates. • As currently written much of this chapter is focused on these highly uncertain areas of the literature that are not incorporated into USG SCC estimates (e.g. tipping points, and climate change impacts on economic growth). EPA (2023) discusses these issues and why they are not ready to be incorporated into the official estimates. • Furthermore, EPA (2023) estimates of the SC-GHG does incorporate climate benefits such as CO2 fertilization and reductions in cold mortality discussed elsewhere in this report, and this should be noted and discussed. • Finally, this section ignores areas of real controversy in the calculation of SC-GHG as it is used by the USG – namely the question of global vs. domestic benefits and the treatment of discounting when valuing benefits to future generations. These controversial issues deserve far more attention in this report instead of spending so much space on issues on the fringe of the literature that are not even included in USG SC-GHG estimates. • EPA (2016) “Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866 Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases, United States Government.” https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-12/documents/sc_co2_tsd_august_2016.pdf • EPA (2023) “Supplementary Material for the Regulatory Impact Analysis for the Final Rulemaking, ‘Standards of Performance for New, Reconstructed, and Modified Sources and Emissions Guidelines for Existing Sources: Oil and Natural Gas Sector Climate Review’ – EPA Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances.” Docket ID No. EPA-HQ-OAR-2021-0317. https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-12/epa_scghg_2023_report_final.pdf • NAS (2017) “Valuing Climate Damages. Updating Estimation of the Social Cost of Carbon Dioxide” https://nap.nationalacademies.org/catalog/24651/valuing-climate-damages-updating-estimation-of-the-social-cost-of The new discussion by the EPA simply revisits longstanding issues. Switching to separable models like FaIR isn’t an advance, because everything still comes down to choice of influential parameters like ECS, discount rate, etc. They add some new damage components but as discussed they jumped on the M17 findings prematurely. Ch 11 focuses a lot on non-SCC topics like the relationship between temperature and growth because that’s been the focus of a lot of research. It’s not the case that this work is too new to be incorporated into SCC calculations. Moore and Diaz (cited) for example incorporated the Dell et al result into an SCC model. The problem is that the temperature signal in growth isn’t robust so economists aren’t convinced it belongs in the models. We don’t discuss the global vs local benefits issue mainly because standard SCC models have always assumed we should measure global effects and we are not offering an argument otherwise.
----	---------	---------	---

11	116-120	Section 11.1	• This chapter has a heavy focus on the relation between climate change and economic growth and how this relationship factors into the SCC. There is an ongoing debate in the literature about persistence in climate damages as measured by changes in economic growth over time; however, these persistence effects on economic growth are not considered in the most recent version of the SC-GHG used by the USG – EPA (2023). This chapter generally ignores the existence of EPA (2023), it is mentioned once in passing, and does not inform readers that these controversial areas of current research are not included in government estimates of the SC-GHG. • EPA (2023) page 58 says, “Given the statistical insignificance of the estimated coefficient on the productivity indicator in the published Howard and Sterner meta-analysis, the SC-GHG estimates presented in this report do not rely on Howard and Sterner’s specifications that include productivity effects. This is consistent with the authors’ recommendations in the published paper, to only consider the inclusion of the productivity impact in sensitivity analysis. However, the question of whether the effects of climate change impacts (e.g., temperature, tropical cyclones, and other extreme weather events) on the economy are only temporary or persistent is an active area of research. Over the past decade, a host of empirical studies have found evidence of temperature changes having persistent effects on the economy (e.g., Dell et al. 2012; Burke et al. 2015; Moore and Diaz 2015; Deryugina and Hsiang 2017; Ricke et al. 2018; Burke and Tanutama 2019; Colacito et al. 2019; Henseler and Schumacher 2019; Kahn et al. 2021; Kumar and Khanna 2019; Bastien-Olvera et al. 2022); this is an important finding because even small changes in economic growth rates accumulate into large economic impacts over time.” Some are discussed in Section 11.1.2 but our review is more up to date.
11	116	1	• “Economists have long considered climate a relatively unimportant factor in economic growth, a view echoed by the IPCC itself in AR5.” • It would be good to update this to the relevant conclusions in AR6 to reflect the more recent literature. AR6 didn’t have an economics chapter comparable to AR5.
11	117	5	• This section makes an important point, much of the public does not understand that climate impacts are relative to projected future without climate change and need to be put in the context of economic growth and a future where our decedents are better off than we are today. O’Neill (2023) is a useful citation here, finding that, “Climate change research and assessments, including the most recent IPCC report, paint an increasingly dire picture of the future. However, the assumption that the future will be worse than the present may be wrong for many aspects of human well-being.” • O’Neill, B.C. Envisioning a future with climate change. Nat. Clim. Chang. 13, 874–876 (2023). https://doi.org/10.1038/s41558-023-01784-4 Citation added
11	119	3	• “Overall they could not detect a temperature effect on GDP or GDP growth, and they estimated the 95 percent confidence interval for the impact on global growth as of 2100 even under the exaggerated RCP8.5 warming scenario spans .86 percent to +388 percent. In other words the net effect is likely positive but too uncertain to distinguish from zero.” • This finding from Newell et al. (2021) needs to be contextualized with their complementary finding that models excluding growth effects and relating temperatures to GDP levels are far more certain. This is important to include since the actual USG application of SC-GHG does not include growth effects. • Newell et al. (20201) states, “Models relating temperature to GDP levels yield climate impact estimates that are far more certain. The best such models imply GDP losses by 2100 of 1–3%, consistent with damage functions currently embedded in the major integrated assessment models that underpin the U.S. social cost of carbon.” The discussion in this section is focused on the effect of dT on growth. The discussion of how dT affects the level of income is what 11.1.1 focuses on. It’s very regionally heterogenous so the small global average reported in Newell et al. isn’t very insightful.
11	119	6	• “To summarize, economists consider climate a relatively unimportant factor in economic growth, a view echoed by the IPCC itself in the Fifth Assessment Report.” • Need to update to reflect AR6 findings. See above

11	121		• “The concepts of estimation and uncertainty do not readily apply to SCC calculations.” • The discussion of uncertainty in IAMs should reflect EPA (2023) which incorporated many major advances in the treatment of uncertainty in integrated assessment modeling. See section A.8 of EPA (2023) for a summary of the quantified sources of uncertainty in the SCGHG estimates presented in EPA (2023) • EPA (2023) “Supplementary Material for the Regulatory Impact Analysis for the Final Rulemaking, ‘Standards of Performance for New, Reconstructed, and Modified Sources and Emissions Guidelines for Existing Sources: Oil and Natural Gas Sector Climate Review’ – EPA Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances.” Docket ID No. EPA-HQ-OAR-2021-0317. https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-12/epa_scghg_2023_report_final.pdf Our point is that the key underlying parameters are uncertain, and the range of SCC estimates merely reflects those uncertainties. The fact that the EPA proposes ways to compute distributions of the SCC doesn’t affect this point, it follows from it.
11	121	3	• “Economists use IAMs to compute the SCC. Two of the best known are the Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution (“FUND”, Tol 1997) and Nordhaus’ DICE.” • This is old literature. Given the advances since FUND and DICE were the leading SCC models, and this report’s focus on literature post-2020, this section should be updated to focus on the models used to calculate the SC-GHG in EPA (2023) which represents advances over the approach used in FUND and DICE in response to NAS (2017) recommendations. Added a mention of this. • EPA (2023) “Supplementary Material for the Regulatory Impact Analysis for the Final Rulemaking, ‘Standards of Performance for New, Reconstructed, and Modified Sources and Emissions Guidelines for Existing Sources: Oil and Natural Gas Sector Climate Review’ – EPA Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances.” Docket ID No. EPA-HQ-OAR-2021-0317. https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-12/epa_scghg_2023_report_final.pdf
11	121	4	• “and a ‘judgmental adjustment’ of 0.5 percent for excluded impacts at 3°C warming” • EPA (2023) is the most up to date representation of the USG approach to SC-GHG incorporating the recommendations of the NAS (2017), and EPA (2023) explicitly does not included an adder for missing damages. This is another example of this chapter focusing on older less relevant literature, and it really should be comprehensively updated to address EPA (2023). Barrage and Nordhaus is a (2024) paper. We don’t endorse their approach, just describe it. But in some respects the EPA approach is already obsolete because the new Administration has abolished the SCC. • EPA (2023), page 59 states, “the model runs performed for this report do not adopt a 25% adder (as used in the DICE model (e.g., Nordhaus 2017)) to account for unknown or missing damages for the meta-analysis-based damage module.” • EPA (2023) “Supplementary Material for the Regulatory Impact Analysis for the Final Rulemaking, ‘Standards of Performance for New, Reconstructed, and Modified Sources and Emissions Guidelines for Existing Sources: Oil and Natural Gas Sector Climate Review’ – EPA Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances.” Docket ID No. EPA-HQ-OAR-2021-0317. • NAS (2017) “Valuing Climate Damages. Updating Estimation of the Social Cost of Carbon Dioxide” https://nap.nationalacademies.org/catalog/24651/valuing-climate-damages-updating-estimation-of-the-social-cost-of

11	122	6	• “Abatement costs: IAMs represent the cost to the economy of reducing CO2 emissions. If CO2 emission reductions are assumed to be inexpensive, then the model will conclude that the optimal policy should aim for deeper emission cuts and vice versa.” • IAMs such as DICE are often used in a mode of calculating the optimal level of abatement where they do indeed compare the SCC with the marginal cost of abatement to find the optimum. However, these abatement costs are not part of the SCC calculation, and as used by the USG for the purpose of regulatory impact analyses, this feature of these IAMs is not used. Instead the USG has other more appropriate tools for analyzing the costs of specific regulations. This distinction is important here as the assumptions about the cost of emissions abatement does not have any bearing on the calculation of the SCC. The paragraph has been rewritten to clarify this.
11	122	7	• “For example, in 2023 the U.S. Environmental Protection Agency raised its preferred SCC value about 5-fold over the estimates it had issued ten years earlier. This is not because new data had been collected or better mathematical methods had been invented, but because new assumptions had been used, and the validity of those assumptions was a separate question.” • This paragraph contains the only reference to EPA (2023). First, the characterization of this update as only because new assumptions are used is factually incorrect. EPA (2023) represents a significant change to how the USG calculated the SC-GHG moving away from the FUND/DICE/PAGE models used in the IWG era (see EPA (2016)) to a modular approach as recommended by NAS (2017). This chapter needs to address the NAS (2017) recommendations and the EPA (2023) response to those recommendations to capture how SC-GHG was actually used by the USG and how the literature has evolved over time. The tabulations in EPA 2023 p. 81 show that if they had not changed the Ag productivity assumption and added a large mortality cost they’d have ended up with SCC numbers very close to the 2013 IWG numbers. Assuming very low discount rates did the rest. Using the FaIR model with the DSCIM and GIVE damage modules wasn’t the key change, it was the changed assumptions about damage drivers and discounting. • EPA (2016) “Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866 Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases, United States Government.” https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-12/documents/sc_co2_tsd_august_2016.pdf • EPA (2023) “Supplementary Material for the Regulatory Impact Analysis for the Final Rulemaking, ‘Standards of Performance for New, Reconstructed, and Modified Sources and Emissions Guidelines for Existing Sources: Oil and Natural Gas Sector Climate Review’ – EPA Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances.” Docket ID No. EPA-HQ-OAR-2021-0317. https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-12/epa_scghg_2023_report_final.pdf § NAS (2017) “Valuing Climate Damages. Updating Estimation of the Social Cost of Carbon Dioxide” https://nap.nationalacademies.org/catalog/24651/valuing-climate-damages-updating-estimation-of-the-social-cost-of
11	123	2	• “It should also be noted that the SCC is focused on the social costs of CO2 emissions from fossil fuel use. It does not measure the private marginal benefits to consumers and society from the availability of fossil fuels. Public willingness to pay for fuels of all types indicates the value to society of reliable, abundant fossil energy.” • Two points to make about this section. First, the benefits to society generally accrue from the provision of energy services, not from specific fuels.” A distinction without a difference in this context. Second, the private marginal benefit of the availability of fossil fuels or energy services is not part of the SCC because changes in the cost and provision of the energy services should be part of the other side of the cost benefit analysis. The SCC is used to characterize the benefits of GHG emissions abatement, and the changes in the costs and availability of energy services are part of the cost of emissions abatement. Agreed, changed the wording to clarify
11	125	5	• “the uncertainty of SCC estimates doesn’t mean that other regulatory measures are inherently better or more efficient.” • ‘regulatory measures’ is a poor word choice here as it can be confused with the regulation itself instead of the metric used to assess the regulation. Changed measures to instruments

11	123-125	Section 11.1	• Section 11.2.4 has an interesting discussion of tipping points. This is an active area of research in the field, however it needs to be noted that tipping points or tipping elements are not included in the SC-GHG as used by the USG, see EPA (2023). • EPA (2023), page 3 says, “For example, the modeling in this report omits most of the consequences of changes in precipitation, damages from extreme weather events, the potential for nongradual damages from passing critical thresholds (e.g., tipping elements) in natural or socioeconomic systems, and nonclimate mediated effects of GHG emissions other than CO2 fertilization (e.g., ocean acidification due to CO2 emissions, tropospheric ozone formation due to CH4 emissions). Importantly, this update does not yet reflect interaction effects and feedback effects within, and across, natural and human systems. For example, it does not explicitly reflect potential interactions among damage categories, such as those stemming from the interdependencies of energy, water, and land use. These interactions and feedbacks, and others, were highlighted by the National Academies as an important area of future research for longer-term enhancements in the SC-GHG estimation framework.” Not necessary to say this since EPA is on hold from doing SCC calculations
12	129	1	• This chapter summary is misleading as it is describing change from today’s temperature rather than the effect on future temperatures. A change from today’s temperature is the future temperature. Not sure what the objection is.
12	129	2	• “And even if global emissions were to stop tomorrow, it would take decades or centuries to see a meaningful reduction in the global CO2 concentration and hence human influences on the climate.” • If global emissions were to go to zero tomorrow, CO2 concentrations would stabilize, and global temperature would be approximately constant. Net negative CO2 would result in reductions of concentrations and temperatures. In other words, while reducing global CO2 emissions to zero might not lead to near-term reductions in CO2 concentrations from today’s levels, it would stop future increases in CO2 concentrations. Consistent with what we stated.
12	129	3	• This section is focused on unilateral action, but needs to address questions related to collective action and individual actions by multiple parties when the benefits of abatement and the damages from emissions have extensive externalities. • Kotchen (2021) provides a theoretical perspective on the global vs. domestic SCC question and addresses questions related to how an individual country’s decisions are impacted by the expected choices of other countries given that GHG emissions are globally mixed the benefits of GHG abatement are shared widely. • Kotchen (2021). Which Social Cost of Carbon? A Theoretical Perspective. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists. https://doi.org/10.1086/697241 An interesting line of thought but we can’t get into game theoretic models here.
12	129	4	• “Since that rate has been averaging about 50 percent of emissions in recent decades, a reduction of global emissions by 50 percent would (at least temporarily) halt the rise in atmospheric CO2.” • This may be addressed in earlier chapters that this reviewer has not read yet, but the standard framing is that stabilizing CO2 concentrations requires balancing emissions by sources and removals by sinks. Removals by sinks includes both natural sequestration and anthropogenic sequestration (e.g. afforestation if it can be done that increases the overall land sink removal, or direct air capture). It could be useful to clarify this here. The discussion is only an approximation for illustrative purposes
12	129	5	• “Lomborg (2016) estimated that full compliance with the Paris Accord would not stop warming, it would only prevent about 0.1C warming and delay hitting the baseline year 2100 temperature levels by about a decade.” • Note that the Lomborg (2016) finding is related to, “the of impact of the total, global emission cuts implied by all the submitted INDCs,” this is different than ‘full compliance with the Paris Accord’ as the INDCs analyzed in the paper are only the first round of Intended Nationally Determined Contributions submitted ahead of COP-21, and the Paris Accord requires additional Nationally Determined Contributions every 5 years. Since Lomborg (2016) only analyzes these INDCs, and parties have submitted two rounds of NDCs since then, suggest changing the wording here to, “... full compliance with initial commitments submitted ahead of the Paris Accord.” Changed to reflect this.

12	129	Chapter	• [NOTE: this comment is long and could be difficult to read in excel. It is included here once as a full comment, then again broken into multiple parts for ease of reading. This is PART 1] • Section 12.1 is titled, “The scale of the problem,” is framed around contrasting criteria air contaminants with CO2 emissions; however, there really are three separate issues that need to be disentangled: Stock vs. Flow. • The challenge here is that abatement costs borne by people today benefit people in the future – temporal externalities. • CO2 emissions are a stock pollutant, so impacts depend on the cumulative emissions to date, whereas traditional criteria are a flow pollutant and impacts depend on the emissions at that point in time. Emissions of a stock pollutant going to zero will not affect impacts at that point in time, as the stock remains unchanged, but will have large impacts in the future as the stock will cease to increase until emissions resume; whereas emissions of a flow pollutant going to zero will immediately eliminate impacts, but impacts will have no lasting effects on future impacts as they will immediately resume when emissions resume. • The sentence at the end of the second paragraph of this section reads, “And even if global emissions were to stop tomorrow, it would take decades or centuries to see a meaningful reduction in the global CO2 concentration and hence human influences on the climate.” This is conflating the expectations of how stock and flow pollutants work – if global emissions were to stop tomorrow, the fact that there would be no meaningful reduction in global CO2 concentrations is simply the nature of how stock pollutants work, but there would be very large impacts on future temperatures since the stock would cease to increase. Conflating isn’t the right word. We are pointing out the stock-flow issue. • The stock nature of CO2 emissions is a real challenge for justifying CO2 emissions reductions, but it is centered on justifying the costs of abatement being born by people today in order to create a stream of benefits that grow over time and primarily accrue to future generations. This leads to questions important questions about how decision-makers should think about inter-generational discounting, and what costs should or should not be borne today for the benefit of future generations that will potentially be substantially better off. Dealt with in the IAMs section • It’s worth noting that since CH4 emissions are relatively short lived, they behave much more like a flow pollutant than a stock pollutant. If CH4 emissions went to zero, concentrations would fall relatively quickly, and the temperature effects would happen on a much shorter timescale, but if CH4 emissions fully resumed, concentrations would return to previous levels there would be no lasting impact of the previous reductions. This is to point out that the stock vs. flow distinction also happens between different greenhouse gasses and is not purely a distinction between GHG emission and criteria pollutants. The CH4 case is interesting and we haven’t looked at it. Also natural sources and sinks are complicated for CH4
12	129	Chapter	• [NOTE: this comment is long and could be difficult to read in excel. It is included here once as a full comment, then again broken into multiple parts for ease of reading. This is PART 2] • Globally mixed. • The challenge here is that abatement costs borne by people in one location benefit people in other locations – spatial externalities. • The next issue is that GHG emissions are globally mixed, so that emissions in any one location have impacts all over the world. This is a distinct issue from the stock vs. flow issue, as the CH4 example above showed a flow pollutant can also be globally mixed. One can also consider a stock pollutant that is not globally mixed, such as groundwater pollution that depends on the stock of contaminants accumulating in the groundwater not just the flow in any one time period as one would see in surface water pollution. • The globally mixed nature of GHG emissions is a real problem for justifying climate policy as the benefits of any one country’s actions primarily accrue to people in other countries. Conversely, a country benefits from the actions of every other country, not just their own actions. This is a problem of game theory and collective action, as unilateral action may not be justified even if collective action would be. It’s worth noting that this isn’t just a problem of scale – these same problems arise for globally

			mixed CH4 emissions even though as noted above they behave more as a flow pollutant, and would arise for any globally mixed pollutant regardless of the scale of the problem. There is an extensive literature on transboundary pollution that explores these issues. Agree with all this, but discussing these points wouldn't change our overall conclusions
12	129	Chapter	• [NOTE: this comment is long and could be difficult to read in excel. It is included here once as a full comment, then again broken into multiple parts for ease of reading. This is PART 3] Scale. • The challenge here is that solving the problem requires enormous change and potentially enormous costs. However, individual actions need to be considered at the margin. • As discussed in this section and the comments above, stabilizing CO2 concentrations and stopping the increase in global mean temperature requires balancing anthropogenic emissions and removals by sinks. The level global mean temperature stabilizes at would generally depend on the cumulative CO2 emissions up to the point CO2 emissions on net go to zero (the stock of CO2 emissions), and the level of short-lived non-CO2 emissions at that time (the flow of non-CO2 emissions). This would involve an enormous change to the global energy system. The costs of this change would be highly dependent on the timing of reaching net-zero CO2 emissions – in 10 years by 2035 would involve crippling costs to the global economy, in 100 years by 2125 would involve a far more gradual transition and likely impose minimal costs when discounted back to today. • What is missing in this chapter is an acknowledgement that policy needs to be thought of at the margin. Do the marginal benefits of the policy equal or exceed the marginal costs? This is how economists think of these problems and the essence of how the government conducts cost-benefit analysis to inform decision-makers under E.O. 12866. The case study presented in section 12.2 poses the wrong two question. Showing that a policy's emissions reductions are small relative to global emissions, and the resulting impact on global temperatures is also small is tautological. No individual policy will solve climate change, but that does not mean that the individual policy is not justified. The relevant questions for decision makers are: (1) what is the cost of the marginal ton of emissions reductions by this policy? and (2) are those marginal costs smaller than the marginal benefit of a ton of emissions reductions? In practice, question (2) is very difficult to answer, and requires judgements about how to value benefits to Americans vs. benefits to the rest of the world, how to discount benefits that accrue to future generations, and how to consider the impacts U.S. actions have on the likelihood that other countries will take actions that benefit the U.S. These are difficult questions that need to be answered to justify climate policy, and this section would be improved by acknowledging that these are the questions that need to be addressed instead of the awkward argument that the problem is big, and individual policies are small therefore they can't be justified. Ch 12 is only focused on the scale problem. The reviewer is correct that even if the effects are small that doesn't mean they shouldn't be undertaken. Ch 11 is where the logic of cost-benefit analysis including marginal considerations is explored.

12	129	Chap ter	• [NOTE: this comment is long and could be difficult to read in excel. It is included here once as a full comment, then again broken into multiple parts for ease of reading. This is the full comment] • Section 12.1 is titled, “The scale of the problem,” is framed around contrasting criteria air contaminants with CO2 emissions; however, there really are three separate issues that need to be disentangled: § Stock vs. Flow. • The challenge here is that abatement costs borne by people today benefit people in the future – temporal externalities. • CO2 emissions are a stock pollutant, so impacts depend on the cumulative emissions to date, whereas traditional criteria are a flow pollutant and impacts depend on the emissions at that point in time. Emissions of a stock pollutant going to zero will not affect impacts at that point in time, as the stock remains unchanged, but will have large impacts in the future as the stock will cease to increase until emissions resume; whereas emissions of a flow pollutant going to zero will immediately eliminate impacts, but impacts will have no lasting effects on future impacts as they will immediately resume when emissions resume. • The sentence at the end of the second paragraph of this section reads, “And even if global emissions were to stop tomorrow, it would take decades or centuries to see a meaningful reduction in the global CO2 concentration and hence human influences on the climate.” This is conflating the expectations of how stock and flow pollutants work – if global emissions were to stop tomorrow, the fact that there would be no meaningful reduction in global CO2 concentrations is simply the nature of how stock pollutants work, but there would be very large impacts on future temperatures since the stock would cease to increase. • The stock nature of CO2 emissions is a real challenge for justifying CO2 emissions reductions, but it is centered on justifying the costs of abatement being born by people today in order to create a stream of benefits that grow over time and primarily accrue to future generations. This leads to questions important questions about how decision-makers should think about inter-generational discounting, and what costs should or should not be borne today for the benefit of future generations that will potentially be substantially better off. • It’s worth noting that since CH4 emissions are relatively short lived, they behave much more like a flow pollutant than a stock pollutant. If CH4 emissions went to zero, concentrations would fall relatively quickly, and the temperature effects would happen on a much shorter timescale, but if CH4 emissions fully resumed, concentrations would return to previous levels there would be no lasting impact of the previous reductions. This is to point out that the stock vs. flow distinction also happens between different greenhouse gasses and is not purely a distinction between GHG emission and criteria pollutants. § Globally mixed. • The challenge here is that abatement costs borne by people in one location benefit people in other locations – spatial externalities. • The next issue is that GHG emissions are globally mixed, so that emissions in any one location have impacts all over the world. This is a distinct issue from the stock vs. flow issue, as the CH4 example above showed a flow pollutant can also be globally mixed. One can also consider a stock pollutant that is not globally mixed, such as groundwater pollution that depends on the stock of contaminants accumulating in the groundwater not just the flow in any one time period as one would see in surface water pollution. • The globally mixed nature of GHG emissions is a real problem for justifying climate policy as the benefits of any one country’s actions primarily accrue to people in other countries. Conversely, a country benefits from the actions of every other country, not just their own actions. This is a problem of game theory and collective action, as unilateral action may not be justified even if collective action would be. It’s worth noting that this isn’t just a problem of scale – these same problems arise for globally mixed CH4 emissions even though as noted above they behave more as a flow pollutant, and would arise for any globally mixed pollutant regardless of the scale of the problem. There is an extensive literature on transboundary pollution that explores these issues. § Scale. • The challenge here is that solving the problem requires enormous change and potentially enormous costs. However, individual actions need to be considered at the margin. • As discussed in this section and the comments above, stabilizing CO2 concentrations and stopping the increase in global mean temperature requires balancing
----	-----	-------------	---

			anthropogenic emissions and removals by sinks. The level global mean temperature stabilizes at would generally depend on the cumulative CO2 emissions up to the point CO2 emissions on net go to zero (the stock of CO2 emissions), and the level of short-lived non-CO2 emissions at that time (the flow of non-CO2 emissions). This would involve an enormous change to the global energy system. The costs of this change would be highly dependent on the timing of reaching net-zero CO2 emissions – in 10 years by 2035 would involve crippling costs to the global economy, in 100 years by 2125 would involve a far more gradual transition and likely impose minimal costs when discounted back to today. • What is missing in this chapter is an acknowledgement that policy needs to be thought of at the margin. Do the marginal benefits of the policy equal or exceed the marginal costs? This is how economists think of these problems and the essence of how the government conducts cost-benefit analysis to inform decision-makers under E.O. 12866. The case study presented in section 12.2 poses the wrong two question. Showing that a policy’s emissions reductions are small relative to global emissions, and the resulting impact on global temperatures is also small is tautological. No individual policy will solve climate change, but that does not mean that the individual policy is not justified. The relevant questions for decision makers are: (1) what is the cost of the marginal ton of emissions reductions by this policy? and (2) are those marginal costs smaller than the marginal benefit of a ton of emissions reductions? In practice, question (2) is very difficult to answer, and requires judgements about how to value benefits to Americans vs. benefits to the rest of the world, how to discount benefits that accrue to future generations, and how to consider the impacts U.S. actions have on the likelihood that other countries will take actions that benefit the U.S. These are difficult questions that need to be answered to justify climate policy, and this section would be improved by acknowledging that these are the questions that need to be addressed instead of the awkward argument that the problem is big, and individual policies are small therefore they can’t be justified. If the discussion becomes marginal costs/benefit calculations, then at least the non-existential nature of the discussion has been acknowledged, and it reduces to considering mitigation among many other societal priorities. However, valid this line of reasoning, we consider it outside of our remit and prefer to let readers draw their own conclusions.
--	--	--	--

Ch	page	Para	Comment or Suggested Edit
2	5	Fig 2.2	The graph is not relevant to the discussion. It should only, at most, cover the time period since the last glacial maximum, which occurred ~20 kyr BCE, and common practice is to concentrate on the last 1000 years. Figure 2.2 has been deleted
3	11,12	Sec 3.1.1	There is no quantification of the effects of TSI and volcanic aerosols that would lead to modifications of the radiative forcing shown in the figures In Chapter 6 we discuss ranges of TSI forcing that even the IPCC acknowledges.
3	21,22	Sec 3.3	Many of the arguments and references are dated. Further, the challenge posed is to prove a negative, i.e. that the record used by AR6 is not biased by urban heat island effects. On the contrary, while verbally stating uncertainty, the authors cannot make a claim that the AR6 statement is false. Even if one were to accept the Soon, et al value of 0.89 deg C/century, the focus on the land surface warming completely neglects the contribution of the oceans to global surface temperature change, which must be considered in any discussion of surface temperature change. The underlying studies frame statistical tests appropriately to test for the presence or absence of an effect. Yes, the literature is dated and the topic needs renewed attention. The question is bias in the land record, but no one is arguing all surface warming is due to urbanization.
4	30	Sec 4.4	The statement "TCR is more generally related to peak warming and better constrained by historical warming, than ECS." requires further context. While true that the "peak warming" rate achieves a maximum around 70 years, temperature increases continue for several centuries and approaches the ECS value asymptotically. Further, the Lewis (2023) arguments were placed in context by Sherwood and Forest (2024), that identified multiple recent ECS studies that showed, collectively, that the PDF in their original Sherwood, et al paper could not be narrowed. Additionally, the reference to Sherwood et al (2020) is incorrect. It omits many authors and the authors that are listed are not in the correct order. Reference to peak warming deleted.
5	37, 38	Sec 5.4	The analysis presented of the IPCC AR5 figure, Fig 5.6 in the current document, is outdated and should be removed. The issue is addressed in the AR6, but not graphically, in the text reproduced by the authors. If the section is retained, it should be moved ahead of Section 5.3 to present the material in the correct order chronologically. The analysis in Fig. 5.6 matches the updated data in Fig 5.7, and it is relevant to show that the information was included in the AR5 but only in a figure in the Supplement. The order of presentation in the chapter is appropriate.
6	57	para 1	The conclusion "The rise in Tmin has been strongly related to the growing presence of manufactured surfaces around the weather stations over the last 100+ years (the so-called urban heat island effect; Section 3.3 and Spencer et al. 2025)." is only found in an author's self-citation of Spencer, et al, (2025) that does not appear in the references at the end of Chapter 6. Further, the trend of greater increases in Tmin relative to Tmax is documented and explained in Easterling, et al (1997). https://doi.org/10.1126/science.277.5324.364 ; Thorne, et al (2016) https://doi.org/10.1002/2015JD024584 . The trend cannot be attributed to UHI effects. We added citations to the literature to substantiate the point.

8	85	para 5	"... datasets with high TSI variability can explain more than 70 percent of the temperature variability since preindustrial times." Variability on what time scales? 11-year cycles? How would this impact the well documented surface temperature increase of > 1 deg C global temperature change since 1900? There is a whole spectrum of variability in TSI beyond the 11-year cycle. These are discussed in the papers we reference.
8	85,86,87	"Natural variability of large-scale ocean circulations"	The discussion neglects the influence of vertical mixing on surface temperature. The global ocean has warmed, as documented by increases in global ocean heat content, e.g. Murphy, et al (2009) doi:10.1029/2009JD012105 We do not understand the comment.
8	88,89	Optimal fingerprinting discussion	This section is hardly a balanced and objective review. The report authors are known opponents of optimal fingerprint approaches and have been a loud, but very small minority voice. It is interesting that even they conclude "...these analyses do not falsify results of the IPCC optimal fingerprinting method..." The point is that falsification would require redoing all the underlying studies. The findings so far show that the method is flawed and the justification for relying on it is invalid. The sentence has been rephrased for clarity.
8	90,91,92	Section 8.4	This discussion is incomplete and fails to take into account the extensive literature on cloud and surface albedo feedbacks.. There is an extensive discussion about the post 2015 period and recent record annual global surface temperatures, implying, but not stating, that recent changes are the result of natural variability, or decreases in atmospheric aerosol concentrations. Comparing the radiative forcing from these changes with long-term GHG forcing, particularly CO2 is misleading to the average reader. If the reduction in albedo can be tied to atmospheric cloud and aerosol changes, as the authors state, they cannot ignore the likelihood that the changes are the result of anthropogenic factors, i.e. sulfate aerosol reduction through cleaner technology and the well-documented positive low-cloud feedback. The discussion is incomplete because the underlying science is incomplete, as we emphasize. We are surveying a complex area of ongoing research without taking a strong position ourselves.

Full document			In the limited time allowed, this reviewer concentrated on sections related to the physical climate and climate change. Frankly, the document was discouraging. Secretary Wright wants a " ... a more thoughtful and science-based conversation about climate change and energy." I find that this report distorts the science in much the same way as the media coverage about which he complains. Most notable are the omissions or under-reported significant climate changes, such as sea-ice decline, changes in the global water cycle and increases in heat-stress due to increases in absolute humidity (from water-vapor feedback). Further, the examples used by the report authors are narrow and appear to be selected to emphasize uncertainty, while the more rigorously evaluated science that contradicts their limited discussion is ignored, perhaps because it does not fit their narrative. This is unfortunate, because I believe it detracts from the much needed discussion about the future, including energy policies, technologies and trade-offs. I encourage DOE to start the discussion by accepting the well-reviewed and broadly accepted scientific conclusions of the IPCC Working Group 1, with respect to the observations and analyses of climate change in the 20th and 21st centuries. Skepticism regarding predictions/projections of future climate based on posited scenarios is justified. As a member of the physical climate research community, I believe there are better uses for the models (and the computer resources they consume) than scenario projection simulations, to inform the discussion that is urgently needed about the future. Comments noted.
---------------	--	--	--

Chapter Number	pg	para	Comment or Suggested Edit
Foreword	vii	4	The stated charge to the team was to summarize the current state of climate science, but in the Preface the team states that it chose to focus on topics that are downplayed in or absent from current assessment reports. To accurately describe the contents of the report, the Foreword should also state that the report is a summary of the things that the author team thinks have been downplayed in major climate assessment reports. Noted, the Preface has been modified. Our charge was not to summarize the whole of climate science.
Foreword	vii	8	The statement about climate change not being the greatest threat facing humanity is a value judgement. Since the Secretary criticizes others for blurring the line between scientific conclusions and policy recommendations in the second, fourth, and sixth paragraphs of this Foreward, it is hypocritical to offer a value judgement without clearly labeling it as such and noting that such conclusions must necessarily involve one's beliefs in addition to scientific information. We did not write the Secretary's foreword.
Exec Summ	viii	2	It is misleading (cherry picking) to only mention "global greening" (i.e., the influence of elevated CO2 on plant growth) here without also noting the impacts of elevated temperatures and changing precipitation patterns on ecosystem health and agricultural productivity. (This comment is also true of the underlying content on pages 3-7) This issue has been addressed with wording changes to acknowledge the other contributors.
Exec Summ	viii	2	It is misleading to state that ocean pH levels are within the range of natural variability. This statement is not true on the timescales governing the impacts of ocean acidification on ocean ecosystems and fisheries. (This comment is also true of the underlying content on pages 8-9) The statement has been removed.
Exec Summ	viii	3	It is inaccurate to say that "scenarios of CO2 emissions have tended to overestimate observed levels". As the authors themselves note on page 15, it is impossible to reliably predict societal behavior regarding energy production and other sources of emissions, so the climate science community has never provided or suggested that there is a single predictive scenario against which future emissions could be judged. Rather, there has always been a range of projected emissions scenarios, and emissions have always tracked within the envelope of those scenarios. The authors make a reasonable point in the full text about the large number of climate studies that have used RCP 8.5, whereas actual emissions have recently been closer to RCP 4.5. This would be a more appropriate finding to include here in the executive summary. The point being made here is that observations have tracked the low end of the envelopes, a problem going back decades. See Figure 3.2.1

Exec Summ	viii	4	Stating that climate models "offer little guidance on how the climate responds to elevated CO2" is at best an unjustified (and at worst a biased) judgement given that the authors chose to focus only on the shortcoming and deficiencies of these models, and do not account for the progress made in improving the ability of these models to reproduce many key aspects of observed climate change. The same is true for all of Chapter 5. It is informative for readers to see key ways in which models fail to match observations especially those most relevant for policy making. The continuing broad range of responses is an important limitation to their fitness for purpose.
Exec Summ	viii	5	Stating that climate models "generally run hot" is an inaccurate and misleading summary statement. A large number of papers and scientific assessments have validated the ability of climate models to accurately simulate many major aspects of global climate. Like all models, climate models are imperfect, and some models have recently shown a tendency to produce higher climate sensitivities--the IPCC AR6 acknowledged this "hot model problem" and there has been considerable discussion in the scientific literature about it and its implications for impacts studies. But this is a relatively recent phenomenon, and there could be other reasons for the recent mismatch (i.e., under-estimates of the reduction in aerosol cooling due to air pollution controls). A balanced scientific assessment would also note, for example, that climate model projections from the 1970s and 80s have accurately predicting the observed trend in global temperature over the past few decades. The question is not whether the models "accurately simulate many major aspects of global climate". It is rather whether the models accurately simulate the climate's response to anthropogenic influences. Our statements are substantiated by the Figures in Ch 5 (especially Figs 5.2 - 5.4). As we discuss, the problem of the tropospheric mismatch goes back decades.
Exec Summ	viii	6	It is misleading and inaccurate to say that most extreme weather events do not show long terms trends. It is true that some kinds of extreme events, like tornadoes, have not shown appreciable or detectable changes, and that changes in wildfire must account for changes in land management. But a "summary of the current state ofthe science" should acknowledge that there is clear evidence that heat waves are becoming more frequent and more extreme, extreme precipitation and nuisance flooding are becoming more common, etc. (This comment is also true of the underlying content in Part II) The chapter presents a great deal of data that substantiates our summary statement. We also provide clear indications on heatwave trends including where they are increasing in frequency. Our assessments match those in the IPCC and NCA documents.
Exec Summ	viii	6	It is misleading to state that the aggregate sea-level rise trend in U.S. tide gauges is not accelerating, because as noted in the same sentence, there are significant regional differences in SLR (primarily due to differences in land subsidence), so only looking at domestic gague data is insufficient to determine if sea-level rise--an inherently global process--is accelerating, with regional factors superimposed on that global trend. There is clear evidence that global sea level rise is accelerating. Moreover, while land subsidence has offset sea level rise in some U.S. regions, the opposite is true in others, and in those reasons the combined effects of sea level rise and subsidence are posing considerable risks to people and infrastructure in those regions...but this important context is omitted. (The same is true of the sea level rise analysis on pages 75-78.) We state that global sea level rise has accelerated in recent decades. The reviewer needs to provide evidence for the claim of acceleration. SLR is a regionally-heterogeneous phenomenon and we discuss the differences by location. We present tide-gauge data for many locations so readers can see the situation for themselves.

Exec Summ	viii	9	Most of the sentences in this paragraph are not factual in nature. For example, the call for uninterrupted observations of the global climate system is a research recommendaiton that is outside the remit of this report and is not supported by text within the document. The same sentence also implies that current emissions scenarios are not "realistic", which is not a defensible statement given that historical emissions have tracked within the envelope of previous emission projections (see comment above and Figure 3.2.2), and argues that climate models should address biases and uncertainties, which is something that every climate modeling team already spends an enourmous amount of time doing. If retained, the non-scientific portions of this paragraph should be moved to the Preface, and the misleading statements should be corrected. The paragraph has been moved to the end of Chapter 12. See above regarding emission scenarios.
Preface	ix	1	The focus on "whether carbon dioxide emissions engdanger the U.S. public" is slightly different from the stated focus in the Foreward on "the Nation's climate". This distinction is important because climate change and its impacts outside of U.S. borders can endanger the U.S. public both directly (e.g., global processes affecting sea level rise in the United States, or the impacts of climate change on overseas military installations) and indirectly (i.e., impacts of climate change on international agricultural production and trade dynamics). The reference to endangerment has been removed.
2	3	1	The two summary statements provide an extremely narrow and misleading view of "direct impacts of CO2 on the environment" (the chapter title). The most obvious direct impact of CO2, in the context of climate change, is its role in global radiative forcing, which is covered in the next chapter but not mentioned here. The chapter should at a minimum be retitled, but better yet combined with the following chapter which discusses other aspects of increasing CO2. The effect of CO2 on the climate takes up the bulk of the report.
2	3	2	It is misleading to state that ocean pH levels are within the range of natural variability. This statement is not true on the timescales governing the impacts of ocean acidification on ocean ecosystems, fisheries, and other processes. The evidence we cite shows that pH levels are in the range of natural variability. Whether the rate of change is, is much more difficult to establish because of the limitations of paleo records. Also the spatial heterogeneity is not subject to comprehensive measurement, which precludes straightforward assessment.
2	5	1	It is misleading to show (only) a graph of CO2 levels over hundreds of millions of years. These timescales are generally not relevant to processes and issues surrounding anthropogenic CO2 increases. For example the authors in multiple places make statements about CO2 levels during the last glacial maximum, but those fluctuations are undetectable on a graph with such a long timescale. The figure has been removed.
2	8	1	Acidification is not a misnomer...the word literally means to make something more acidic, which is what is happening. The authors may choose to argue that the term is misleading since the oceans are slightly basic, but that is not the same thing as a misnomer. We consider it a misnomer for the reasons stated. The oceans are not becoming acidic.

2	8	1	It is misleading and largely irrelevant to discuss ocean pH levels tens of thousands or millions of years ago, because that timescale is not relevant to the impacts associated with anthropogenic ocean acidification on ocean life. It is well documented that recent changes in ocean pH are happening ~100 times faster than natural fluctuations prior to human CO2 emissions, and marine species must adapt to changes in conditions on timescales of a few of their lifetimes, which is clearly not millions of years. The reviewer needs to provide specific sources for these statements. Also, it is a relevant point to make if current marine life evolved under conditions of much lower pH.
2	9	4	Similar to previous comment--changes in marine life over hundreds of millions of year has little relevance to the survival of marine species on decadal timescales due to anthropogenic ocean acidification. Are the authors trying to suggest that U.S. society would be well served by going back to conditions during the Jurassic? See earlier response.
3	13	2	The IPCC probably discounted the results reported in Connolly (2021) because that study included methodological errors that were documented in several subsequently publications, which the authors do not acknowledge. A serious assessment of TSI would not cherry-pick a single study, especially one that has been shown to include serious errors. The reviewer is probably referring to a comment by Richardson and Benestad, but Connolly et al. replied effectively to their critique.
3	14	4	It is unclear what the authors mean by "other natural sources of energy imbalance". If the authors are aware of a plausible additional source of energy imbalance they should state what it is rather than making vague statements without providing any evidence that such sources might exist. Surely the reviewer acknowledges that there are unknowns in the climate system
3	14	5	This is one of several places where the authors discuss the CO2 levels at which C3 plants begin dying in the context of the last glacial maximum. This is misleading, because there is no evidence that CO2 levels would have continued falling below the levels of the last glacial maximum, and irrelevant to the stated focus of this report, because they rebounded to 280 ppm many centuries before human activities began producing large amounts of CO2. The reviewer needs to provide evidence for the assertion that CO2 levels would not have continued falling.
3	15	1	The oceans and land surface absorb more like 60% of CO2 emissions. The 50% figure is repeated multiple times in the ensuing pages and should be corrected. We are unfamiliar with the 60% number; the sources with which we are familiar generally report numbers closer to 50%. The reviewer has not cited any sources for his or her statement.
3	20	2	The final sentence on this page is misleading and confusing as written. Most studies of the land carbon sink suggest that the rate at which it is increasing is declining, and several studies suggest that the ocean sink is declining. The authors should also explain the relevance of their statements here, because it isn't clear. Our statement is consistent with the sources we cite. Unfortunately the reviewer did not provide references.
4	26	6	The inclusion of a paragraph with high-level summary statements about climate policy here is confusing and inappropriate. This content belongs in chapter 11. We only make a brief introductory statement and otherwise defer the discussion to Ch 11.

4	29	1	The point about observed global temperature trends being consistent with both high-ECS high-aerosol and low-ECS low-aerosol worlds is an important one. It would be good to acknowledge that uncertainty in ECS is not just due to uncertainties in climate models, but also the lack of accurate measurements of pre-industrial aerosols and thus anthropogenic changes in aerosol forcing. And this uncertainty cuts both ways--if we live in a high-ECS world that has been "masked" by strong aerosol cooling, reducing air pollution could result in rapid warming (and this may be linked to the "hot model" problem as well). Agreed
4	29	2	The point about ECS values derived from past climate states (especially cooler ones) possibly not being totally representative of the current climate is another good point, one that would be good to acknowledge in their earlier and later discussions about uncertainty and the rationales for emissions reductions (e.g., on page 26 and in Chapter 11). Agreed.
4	30	1	The relatively shallow treatment on TCR relative to ECS here is puzzling, since the authors acknowledge that it is better constrained, and it is also a more relevant value for projected warming over the next several decades. The first sentence here also describes it as an observational constraint, but it is not, it is a metric that can be produced from either data or models (or both), and climate models are routinely used to run TCR experiments. ECS is more widely-used than TCR which is why we focus more attention on it.
5	32	1	A more accurate title of this chapter would be "deficiencies in climate models" because the authors focus almost exclusively on processes and features that models have struggled to reproduce, rather than a balanced assessment that also indicates what these models do well. We changed the title to take this into account.
5	34	1	Scafetta (2023) has been widely criticized in the scientific literature for its methods and conclusions. These results should not be presented without acknowledging these concerns, or better yet, the authors should attempt to survey the literature on this topic rather than presenting results from a single controversial paper. The reviewer is referring to an exchange regarding a different paper. We are unaware of any published critiques of the Scafetta paper we cite.
5	34	2	Spencer (2024) is not a peer reviewed journal paper and is not really appropriate to include here when there are many papers on this topic that have been peer reviewed. The reviewer should have provided references. We are unaware of any peer reviewed papers that present the comparison we show. We provide traceable accounts for the underlying data, all of which is from official sources.
5	35	1	The statement that the signal for anthropogenic greenhouse warming emerges first and most strongly is not supported and is inconsistent with my understanding of climate dynamics. The following sentence is also dubious (and probably backwards) since models run with observed surface temperatures tend to produce much better mid-tropospheric temperature simulations. The statement about early and strong emergence of the CO2 signal in the tropical troposphere is in the IPCC TAR and subsequent reports. Even models constrained with observed sea surface temperatures produce excess amplification aloft.

5	36	1	In most places the authors correctly describe the discrepancy between models and observations as a mismatch, which is appropriate because observations of mid-tropospheric temperatures are also subject to uncertainty (as indicated in the error bars in Figure 5.4). This is one of the reasons for the IPCC confidence assessment noted in the following paragraphs. However, here and in a few other places in this section the writing implies that differences can be solely attributed to model deficiencies. We don't take a position on the ultimate cause however we do note that the biases are pervasive across models and multiple observational data sets.
5	37	1	This section should be combined with the previous one as it is really just elaborating on the same discrepancy between climate models and observational estimates of tropospheric temperatures. One section discusses the discrepancy of trends and the other discusses the discrepancy of amplification rates, which is why the sections are separate.
5	39	1	There has indeed been considerable controversy about this particular metric. It is curious that the authors choose to cite two older papers here (2008 and 2009) rather than the rich recent literature, especially since they went to the trouble of updating on of their graphics with 2024 data. Recommend including a more balanced assessment of this discrepancy, it's potential causes, and recent efforts to address it, as well as noting that climate models are able to accurately capture many other aspects of climate change. Again, it is unfortunate that the reviewer did not provide any citations to this rich recent literature. We cited the key papers we are aware of.
5	39	1	This entire section is very misleading as it cherry-picks a specific result and takes it out of important context. The reason why stratospheric cooling has slowed (and, at least in one study, even warmed) in the past two decades is due to the recovery of the ozone layer. This is clearly stated in the Philipona et al article cited by the authors and in the IPCC report. Additionally, satellite-based estimates of stratospheric temperature (which is data the authors highlight in the previous section) do not show the same trends. This section should be removed or amended to note that stratospheric temperatures are influenced by multiple factors and that a comprehensive analysis of stratospheric temprature trends is fully consistent with those projected under climate warming scenarios. We have added a sentence discussing the ozone recovery issue and make reference to the recent Santer et al. study.
5	41	1	Many observational studies have shown that snow cover is decreasing, and have explained why it is more meaningful and useful to look at spring trends in snow cover, as well as why observations of snow cover can be uncertain. The issue here is model projections versus observations. Again, the reviewer provides no citations.
5	42	4	The authors provide a relatively accurate survey of results regarding hurricane numbers and landfall frequency, which have indeed not shown any trends. But their analysis of hurricane intensity, which has been shown in many studies to increase, is lacking...the chart showing just estimated windspeeds of the top ten landfalling storms is really weak given the analytical talents of the author team. They also do not provide any discussion of the physical basis for why hurricane numbers may not be changing while the intensity of the strongest hurricanes is expected to increase, nor analyze any data in the context of those conclusions.

			The challenge for global intensity metrics is that the satellite record prior to 1980-1990 (experts disagree on the data quality during this period) is inadequate, which is why we focus on the Atlantic hurricane data. Also there is no theory for hurricane number; that is a topic associated with substantial uncertainty.
6	47	5	Long term persistence is not a recognized property or phenomenon associated with rainfall data. The use of such a statistical technique, especially one that is not widely recognized or used in the hydroclimate community, demands additional justification. We have rewritten the text to remove specific reference to LTP.
6	53	4	The authors have cherry picked results throughout this section. For example, they have selected only a few quotes from IPCC and NCA describing extreme heat. The absolute single daily maximum temperature for a given year, for example, is a poor statistic for assessing statistical changes in extreme heat (it would be like comparing the tallest person in each country to try to calculate change in average height). A complete and comprehensive review of the underlying assessments and the data it cites clearly shows that extreme heat has been increasing in North America. The reviewer fails to identify any data or conclusion from the IPCC or NCA that differs from our assessment, and fails to cite any sources to justify this comment.
6	56	1	The "climate less prone to extremes" is a misleading statement. If minimum temperatures are increasing faster than maximum temperatures (which is an expectation of climate change based on basic physical principals), then the difference between warm and cold extremes on many timescales is expected to decrease. There are reasonable points to be made regarding observational deficiencies, regional variations in extreme events, and the potential benefits of reductions in extreme cold, rather than coming up with misleading statistics. But we show that extreme heat has also declined since the 1930s – Figures 6.3.1 and 6.3.3 refute the reviewer's statement.
6	58	3	The NCA5 heading is not a controversial statement, it simply says that things are changing, which they are by the author's own admissions and graphs. It does not suggest pervasive positive trends, as the authors suggest it does. We're not sure what sentence the reviewer is referring to.
6	61	3	The statistical techniques used in the 2019 paper are highly non-standard for evaluating precipitation statistics, and the 2024 results have not been peer reviewed. The results reported in the NCA and IPCC and the underlying studies have clearly demonstrated that extreme precipitation is increasing. The 2019 paper uses ordinary least squares to compute the trend, and a well-known variance estimator from the econometrics literature to assess significance. As we point out, we also find evidence of increasing precipitation averages and extremes but only when selecting certain start dates.

6	61	7	The relevance of the paragraph on 19th century and paleoclimatic rainfall events is unclear. If anything, the fact that such extremes have occurred in the past argues for more aggressive adaptation measures to ensure that damages won't be as high if they happen again (even notwithstanding potential changes in risk due to climate change). Note, however, that additional context is provided in the box that follows two pages later. We agree that discovery of extreme events in the 19th century records indicates that disaster planning may need to encompass a wider range of risks.
6	62	1	The choice of looking at (only) 5-day precipitation totals is questionable. Most rainfall events, including the most extreme and damaging precipitation events, are typically on a daily timescale. Again, the reviewer provides no citations or evidence. Our results are robust to different day intervals, and we refer to 1- and 2-day results as well.
6	68	3	Perhaps this is more germane to the sea level rise section, but nuisance (high tide) flooding due to sea level rise has been observed across much of the united states. This is a topic we did not address.

From: Ross McKitrick <ross.mckitrick@gmail.com>
Sent: Thursday, May 1, 2025 12:07 PM
To: Judith Curry; Steven Koonin; John Christy; Roy W. Spencer; Travis Fisher
Subject: Intro blurb
Attachments: 0.Intro.May1.docx

I took a stab at an intro - see attached (also in the 00.draft folder).

Introduction

This document had its origin in an initiative undertaken in late March 2025 by Secretary Wright to assemble an independent team to write a brief report for him on issues in climate science relevant for energy policymaking, with particular focus on the question of whether carbon dioxide emissions pose a danger to the US public. The authors of this report agreed on the usefulness of such a document and agreed to undertake the work on the condition that there was to be no editorial oversight by the Secretary, the Department of Energy or any other government personnel. This condition has been honored throughout the process and the writing team has worked with full independence.

The team began working in early April with a final submission deadline of May 28. Because of the short timeline and the technical nature of the material we have not tried to produce a comprehensive review of all topics. While the report is intended to be accessible for non-experts, we deliberately omitted some introductory or explanatory material that can easily be accessed elsewhere. Nor have we attempted to survey entire literatures related to the topics selected for focus. The scientific and technical material herein is just a sample of the vast literature on climate change but is, we believe, more than sufficient to establish our conclusions.

The team writing this report was not involved in nor briefed on any administrative processes related to a potential challenge to the CO₂ Endangerment Finding. During the writing of this report we received no information about the Administration's plan on that matter. We were asked, however, to include some information related to the role of US motor vehicles in global climate change, since that is an issue of relevance to the Department of Energy.

The writing team wishes to express its thanks to Secretary Wright for the opportunity to prepare this report and for his support for independent scientific inquiry.

From: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>
Sent: Tuesday, June 10, 2025 9:29 PM
To: Judith Curry; Roy W. Spencer; John Christy; Travis Fisher; Steven Koonin; Josh Loucks;
seth.cohen@hq.doe.gov
Subject: June 10 draft
Attachments: NCA5.Review.[RM].June10.docx

This incorporates all the material (I think) circulated by Judy and Steve today, along with some of my edits. It's also following a suggested organization and Table of Contents, but others may have suggestions for a better flow. .

Review of the Fifth National Climate Assessment

1	INTRODUCTION	2
1.1	ABOUT THIS REPORT	2
1.2	ABOUT THE NATIONAL CLIMATE ASSESSMENTS	2
1.3	STANDARDS FOR ASSESSING NCA PRODUCTS	3
1.4	WHEN PEER-REVIEW FAILS: AN EXAMPLE FROM NCA4.....	5
2	OVERVIEW CHAPTER: HYPERBOLIC ADVOCACY LANGUAGE AND NON-SCIENTIFIC TONE	9
3	OVERCONFIDENCE WHEN STATING CONCLUSIONS	12
3.1	INFLATED CERTAINTY LEVELS	12
3.2	RANGE OF CLIMATE SENSITIVITY	13
3.3	NEW EMISSION SCENARIOS AS A SCIENTIFIC “ADVANCE”	14
3.4	“EMERGENT CONSTRAINTS” AND UNCERTAINTY IN CLIMATE PROJECTIONS.....	15
3.5	INCREASING HURRICANE INTENSITY	16
3.6	OVERSTATING FINDINGS IN UNDERLYING SOURCES	17
4	RELIANCE ON <i>AD HOC</i> TIME SCALES FOR TREND ANALYSIS	19
4.1	AVERAGE AND EXTREME PRECIPITATION.....	19
4.2	HEATWAVES.....	20
5	INADEQUATE TRACEABLE ACCOUNTS.....	21
6	OVEREMPHASIS ON EXTREME SCENARIOS	21
7	BIASED SELECTION OF REFERENCES.....	22
8	SUMMARY: EVALUATION OF THE NCAS	22
8.1	PERTINENT ASPECTS WHEN EVALUATING IN LIGHT OF STATUTORY REQUIREMENTS	22
8.2	EVALUATION FROM THE PERSPECTIVE OF EXPERT USERS OF THE REPORT	23
8.3	EVALUATION FROM THE PERSPECTIVE OF CITIZENS INTERESTED IN GOOD POLICYMAKING	23

1 INTRODUCTION

1.1 About this Report

This report responds to a request from OSTP Director Michael Kratsios (reproduced in Appendix XX) that we assess the suitability of the Fifth National Climate Assessment for informing climate and energy policies.

To conduct this assessment we reviewed NCA5 itself, NASEM review of the Third Order Draft and the USGCRP responses to the review. We have drawn upon our long experience working on advisory reports, including for the NASEM, IPCC and other organizations, as writers, reviewers and project leaders.

We find that NCA5 should not be relied on for policy making as it is an incomplete and misleading picture of our understanding of the changing climate and the risks it poses to the nation. NCA5 was selective and incomplete in its survey of the science as of its publication date in 2023 and has become even more so in the years since. We have reviewed many key scientific developments in a separate report to Energy Secretary Wright (Climate Working Group 2025, herein denoted “CWG25”). The overall effect of the biases and omissions of NCA5 is an excessively dire picture of climate risk.

Our report begins with background on the National Climate Assessments. We then discuss the standards by which we have assessed NCA5, followed by specific deficiencies that we have identified.

1.2 About the National Climate Assessments

The U.S. Global Change Research Program (USGCRP) was established by Presidential Initiative in 1989 and mandated by Congress in the Global Change Research Act (GCRA) of 1990 to develop and coordinate “a comprehensive and integrated United States research program which will assist the Nation and the world to understand, assess, predict, and respond to human-induced and natural processes of global change.”

The National Climate Assessment (NCA) Reports evolved from the GCRA requirement to

Prepare and submit to the President and the Congress an assessment which (1) integrates, evaluates, and interprets the findings of the Program and discusses the scientific uncertainties associated with such findings; (2) analyzes the effects of global change on the natural environment, agriculture, energy production and use, land and water resources, transportation, human health and welfare, human social systems, and biological diversity; and (3) analyzes current trends in global change, both human-induced and natural, and projects major trends for the subsequent 25 to 100 years.

The five NCA Reports to date have interpreted this mandate in different ways:

- NCA1 (2000) was a multidisciplinary effort to study and portray in regional detail the potential effects of human-induced global warming on the United States.
- NCA2 (2009) was a relatively short report that not only focused on the potential consequences of climate change, but also sought to identify potential adaptation measures and identify the highest priorities for future research.

- NCA3 (2014) was an expanded effort that continued along the lines of NCA2, and was distinguished by a comprehensive review process, including a review by the National Academy of Sciences.
- NCA4 (2017/2018) was an expanded effort published in two volumes: I Climate Science Special Report, and II Impacts, Risk, and Adaptation in the United States. This was the first NCA report to devote significant effort to assessing climate science. NCA4 introduced a traceability analysis for each key finding, including a cursory description of uncertainties.
- NCA5 (2023) returned to a single volume format, reducing discussion of climate science to a cursory two chapters, with continuing with a focus on regional and sectoral impacts of climate change. NCA5 expanded its remit to topics that are arguably outside the purview of the USGCRP, focusing on “Climate Action” and policy recommendations with a social justice emphasis. NCA5’s self-description is reproduced as Appendix II.

These successive interpretations of the NCA are poorly aligned with the GCRA’s statutory requirements. Only NCA4 gives serious consideration to climate science, which receives the great majority of USGCRP funding, and even then misrepresents some important points (see the Box nearby for an example). Natural climate variability is essentially dismissed as unimportant in NCA4 and barely mentioned in NCA5 in most contexts, despite the mandate to include both human-caused and natural climate change. Most significantly, NCA5 has redirected the focus away from climate science and even the hazard elements of impacts, towards evaluation of societal vulnerabilities and advocacy for particular policy options, especially wind and solar power. The cover image for the NCA5 Report is the installation of a solar panel.

1.3 Standards for Assessing NCA Products

In Appendix XX we include a letter of guidance from the Office of General Counsel, U.S. Department of Energy, summarizing the extent of statutory requirements governing USGCRP work products in general and NCA products in particular.

We can summarize the standards applicable to the NCA as follows:

- details.

Beyond the statutory requirements we draw attention to two other pertinent standards. President Trump’s executive order of May 23, 2025, “Restoring Gold Standard Science” enumerates some of the characteristics of good science:

- i. reproducible;
- ii. transparent;
- iii. communicative of error and uncertainty;
- iv. collaborative and interdisciplinary;
- v. skeptical of its findings and assumptions;
- vi. structured for falsifiability of hypotheses;
- vii. subject to unbiased peer review;
- viii. accepting of negative results as positive outcomes; and
- ix. without conflicts of interest.

Although these should be self-evident to those trained in science, it is surprising that some have found them controversial.

We consider that when scientific reports are being assembled that will be highly influential on climate policymaking there are other desiderata, including statements about the strength of climate knowledge. The IPCC's approach is based on judgment of the available evidence and agreement among experts. More sophisticated knowledge characterizations for risk management include: REFERENCE AVEN

- The degree to which the assumptions made are reasonable/realistic based on background knowledge—concern about the focus on implausible emissions scenarios RCP8.5/SSP5–8.5
- The degree to which data/information exists and are reliable and relevant—the historical and paleo database is inadequate for a complete characterization of natural climate variability on multi-decadal to millennial time scales
- The degree to which there is disagreement among experts (including those from different environments or academic fields)—attempts to suppress disagreement and alternative perspectives among experts
- The degree to which the phenomena involved are understood and accurate models exist—concerns about the fidelity and utility of climate models
- The degree to which the knowledge has been thoroughly examined with respect to unknown knowns and—neglect of the unknown knowns associated with natural climate variability

Good climate and energy policies will balance the risks and benefits of a changing climate against the world's growing demand for reliable and affordable energy. To strike that balance, policymakers must understand at least two complex and nuanced topics: the certainties and uncertainties of climate science and the technoeconomic realities of energy systems. Experts in those subjects have a unique responsibility to communicate their understanding to non-experts clearly, completely, and without bias.

Expertise in energy systems resides largely in the private sector, where it is essential to providing the reliable and affordable energy services that are the lifeblood of society. Understanding is therefore continually refined and tested by the discipline of the marketplace. In contrast, climate science expertise is found largely in the non-profit realm of universities and government laboratories and so has a more academic character.

Because climate is at the core of human existence, it can engender passion and emotion. Indeed, some younger climate scientists have gone into the field to "save the planet." So it isn't surprising that objectivity can suffer when climate scientists communicate their understanding to non-experts. Further, the field of climate science has been politicized by NetZero mandates. This lack of objectivity usurps the public's right to make informed choices and undermines their confidence in the scientific enterprise.

Philip Handler, President of the National Academy of Sciences, identified the problem in a 1980 editorial that resonates eerily four decades later:

Difficulty arises in the scientific community from confusion of the role of scientist *qua* scientist with that of scientist as citizen, confusion of the ethical code of the scientist with the obligation of the citizen, blurring the distinction between intrinsically scientific and intrinsically political questions. When scientists fail to recognize these boundaries, their own ideological beliefs, usually unspoken, easily becloud seemingly scientific debate.

1.4 When Peer-Review Fails: An Example from NCA4

Peer-review of reports like IPCC and NCA products is not a silver bullet that guarantees quality. The peer review process for these reports differs in some important respects from traditional peer review in academic journals. First, NCA reviewers self-select on a volunteer basis whether to provide comments and what parts of the report to read, whereas in academic journals Editors recruit reviewers and assign them to specific papers. There is no guarantee that any particular section of an NCA report was reviewed by anyone, let alone by someone with a different perspective than the authors. This is a problem with NCA and IPCC reports since over the years many potential reviewers have given up making the effort, because their input has systematically been ignored. Second, and related, NCA authors have near complete authority whether to accept or reject review comments. Here, for example, is how a review comment critical of a section of the NCA5 draft was handled by the authors:

REVIEWER COMMENT

Tropical Cyclones/hurricanes have not increased (Klotzbach, P.J., Bowen, S.G., Pielke, R. and Bell, M., 2018. Continental US hurricane landfall frequency and associated damage: Observations and future risks. Bulletin of the American Meteorological Society, 99(7), pp.1359-1376., Pielke, R., 2021. Economic Anormalisation, A def disaster losses 1998, A 2020: A literature review and assessment. Environmental Hazards, 20(2), pp.93-111.)

US NCA RESPONSE

Thank you for your comment.

This comment is inconsistent with the author team's thorough assessment of the science.

By contrast in academic journals the Editor mandates the authors' response and the reviewer gets to assess its adequacy. Third, once an NCA chapter author team has been selected publication of their work is guaranteed, whereas academic journals routinely reject papers if they do not pass review.

These points are important to bear in mind because some readers might dismiss any criticism of NCA products out of hand on the grounds that they were "peer reviewed". But the test of a report is whether its contents are a valid representation of the available evidence. Here we give an example in which NCA4 gave prominence to a Figure that completely misrepresented the underlying data and which evaded peer review to do so. Further details can be found in Koonin (2024).

As we pointed out in CWG25 Section 6.3 the number of heat extremes in the U.S. peaked in the 1930s and has declined ever since. Taking cold and hot extremes together the U.S. climate has become more moderate over time. NCA4's Part I (Climate Science Special Report, CCSR) says (prominently and with *Very High Confidence*) on Page 19 of the Executive Summary:

There have been marked changes in temperature extremes across the contiguous United States. The number of high temperature records set in the past two decades far exceeds the number of low temperature records.

and offers this figure in support:

Record Warm Daily Temperatures Are Occurring More Often

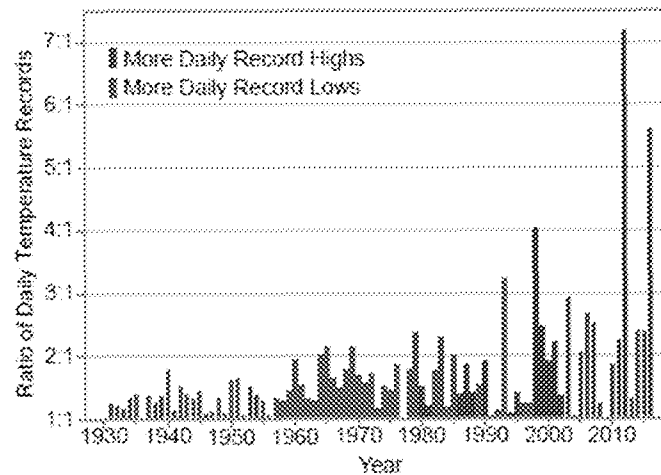
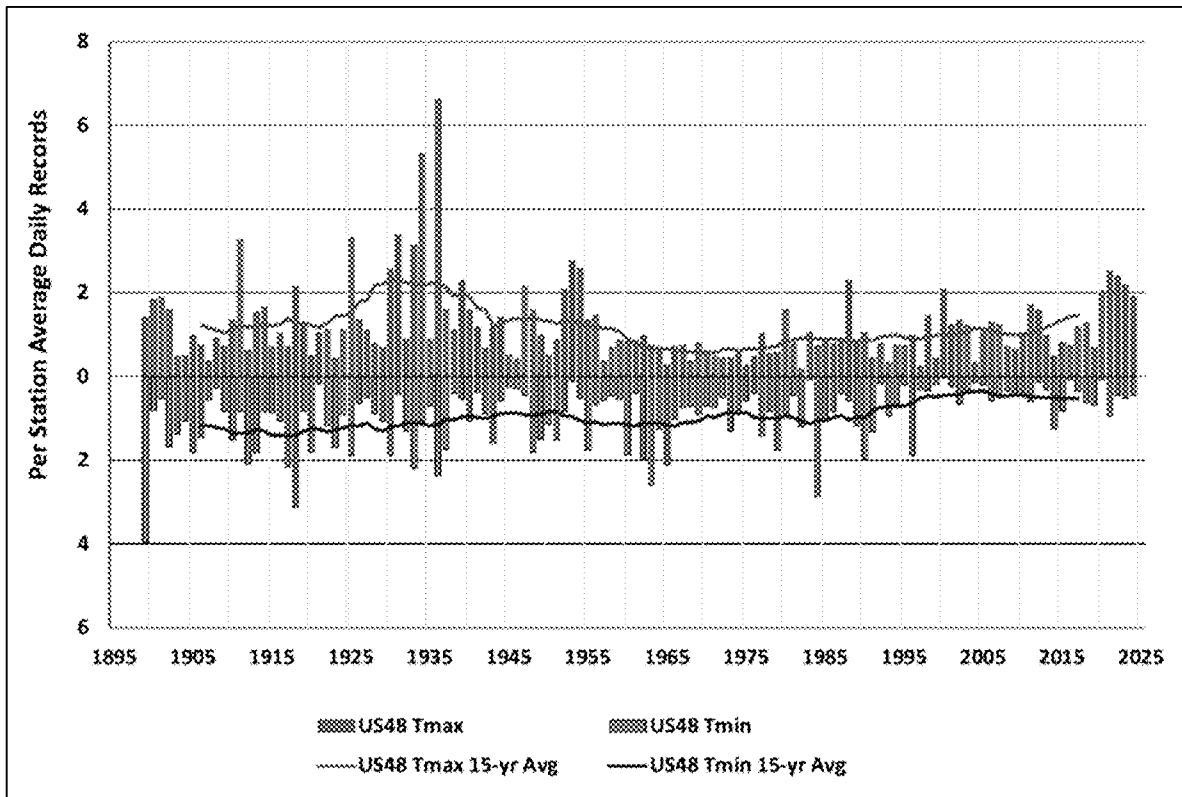


Figure ES.5: Observed changes in the occurrence of record-setting daily temperatures in the contiguous United States. Red bars indicate a year with more daily record highs than daily record lows, while blue bars indicate a year with more record lows than highs. The height of the bar indicates the ratio of record highs to lows (red) or of record lows to highs (blue). For example, a ratio of 2:1 for a blue bar means that there were twice as many record daily lows as daily record highs that year. (Figure source: NOAA/NCEI). From Figure 6.5 in Chapter 6.

The Figure appears to validate the claim that, as the title says, record warm daily temperatures are occurring more often. But the underlying data do not: they show that extreme heat in the U.S. peaked in the 1920s and 1930s and declined thereafter, as NCA4 Figure 6.4 later shows. Figure ES.5 does not show what its title implies: these are not simple counts of cold and warm extreme events, instead they are ratios of the two. In fact both types of extremes declined over the sample interval, but cold events declined more than warm events, so the ratio of warm extremes to cold extremes went up. By graphing the ratio in this way the NCA4 created a visual impression opposite to what is in the data.

Figure 6.3.3 of CWG25 (reproduced below) shows the results of a proper analysis – defining each record as the singular extreme in the history, displaying numbers of warm and cold records separately, and beginning the analysis in 1899 rather than 1930. It makes evident the exceptional heat of the 1920s and especially the 1930s, peaking in 1936. The increased heat of the past five years is too brief to be deemed climatically significant and, in any event, occurred after the CSSR was published in 2017. The frequency of cold records has declined, especially over the last quarter of the period in which only 13 percent of the extreme cold events were measured. In contrast, 25 percent of the extreme Tmax records were achieved in the last quarter, which is consistent with statistical expectations. As a result, the ratio shown in the CSSR explodes in recent decades. The overall reduction in numbers of both cold and hot extremes over the past century indicates a climate *less* prone to extremes, in sharp contrast to the message of the NCA4 Figure.



Number of daily record High (red) and Low (blue) temperatures for warm and cold seasons in the CONUS. The lines represent the 15-year running, centered average. Source: 1,211 USHCN stations supplemented as needed to achieve a minimum of 92 percent of observations in the 126-year period since Dec 1898. US48: contiguous U.S. states. Tmax: maximum temperature. Tmin: minimum temperature. Source: CWG25 Figure 6.3.3.

The National Academies' expert review panel criticized the discussion of temperature extremes in a late draft of the CSSR. In reference to the CSSR's Key Finding 2 of Chapter 6, they said:

Further, it is difficult to understand how a statement that includes increases in extreme warmth can be associated with a high confidence or extremely likely statement, given that most of the graphics in this chapter show a decrease in extreme warmth in the historical record.

The Federal official in charge of the CSSR (Michael Kuperberg, Executive Director of the USGCRP) responded to the Academies' review by noting that

Almost every recommendation from the NAS was incorporated [in the final version]... and a new figure was added on changes in record high and low temperatures

The "new figure" referred to is the Figure ES.5, which did not appear in the draft reviewed by the Academies' panel. It seems unlikely that the Academies panel ever saw that figure because they surely would have commented if they had and it wouldn't have survived to publication. And the figure's problems were evidently not flagged (or were ignored) in the subsequent internal government reviews.

With this background we now present our critique of NCA5.

2 OVERVIEW CHAPTER: HYPERBOLIC ADVOCACY LANGUAGE AND NON-SCIENTIFIC TONE

The opening Chapter 1 “Overview” holds a prominent place since it summarizes the whole report and is the only section that many will read. Although the later Chapters of NCA5 contain much sound scholarly content, Chapter 1 is marred by a pervasive tone and language aggressively promoting emission reduction policies. The authors must have known this chapter would be mined for quotes by the media and activists looking to add an imprimatur of scientific authority to oversimplified declarations of opinion. Many examples can be cited; here we note a few that are particularly egregious.

Chapter 1 opens as follows:

The more the planet warms, the greater the impacts. Without rapid and deep reductions in global greenhouse gas emissions from human activities, the risks of accelerating sea level rise, intensifying extreme weather, and other harmful climate impacts will continue to grow. Each additional increment of warming is expected to lead to more damage and greater economic losses compared to previous increments of warming, while the risk of catastrophic or unforeseen consequences also increases.

This statement presupposes all warming is anthropogenic in origin, all warming is bad and causes economic damage, warming causes extreme weather to intensify. Such sweeping generalizations go well beyond what science has or can establish. A scientifically-sound version of this paragraph would instead say something like the following:

The Earth is warming because of a combination of natural and anthropogenic influences. This warming will generate a mix of benefits and harms that varies by region, to which society should be prepared to adapt. Some types of extreme weather have worsened recently, while others have not changed or have even declined in intensity. Reducing emissions of greenhouse gases might slow the warming although such policies have proven to be costly and disruptive, so any climate actions to be weighed against the potential benefits.

On the next page the Overview goes on to say:

Each additional increment of warming leads to greater risks [here it lists 7 key components of society including food security and the economy]... Without deeper cuts in global net emissions, climate risks to the US will continue to grow... Action to limit future warming and reduce risks can have near-term benefits and opportunities: low-carbon energy jobs, Improved air quality, Health benefits, Economic benefits...”

The authors write as if climate policy does not involve trade-offs and all measures to reduce future warming will be effective and beneficial. But the vast body of scholarship on climate science and economics does not support such simplistic claims. Not every additional increment of warming leads to economic harms, indeed (as is acknowledged in Chapter 19 on Economics) in some cases there will be benefits. Nor is climate policy guaranteed to create jobs or benefit the economy; in many cases it has done the opposite. Such deceit is a disservice to policymakers.

Page 9 promotes renewable energy options by noting, correctly, that the levelized costs of wind/solar generation have fallen sharply since 2010. Yet it has long been known that intermittent renewables generation must be supplemented by dispatchable generation to meet grid reliability standards, and that doing so (e.g., through gas, fission, or storage) more than doubles the cost of electricity. Further, there are yet unmet synchronization challenges in wind/solar-heavy grids. Here again it is advisory malpractice not to acknowledge these facts.

Page 14 presents future emission scenarios with the following description: “Climate modeling experts develop global climate projections for a range of plausible futures.” The word “plausible” is applied to all the scenarios. The accompanying Figure includes both SSP3-7.0 and SSP5-8.5, the latter reaching the same radiative forcing as RCP8.5. The figure does not contrast observed emissions against previous projections nor does it caution readers that SSP3-7.0 and SSP5-8.5 are extreme worst case scenarios that, like RCP8.5, have been heavily criticized in the scientific literature (CWG25 3.2.1). By describing the entire envelope of emission projections as “plausible” the report opens the door to later presenting impacts associated with extreme and implausible emission scenarios as part of a baseline “business-as-usual” future.

[We could criticize Figure 1.6, which uses an anecdote to support its 1200 claim.]

Page 17 (and elsewhere) invokes the NOAA Billion Dollar Dataset as an indicator of extreme weather getting worse. Scientists have shown that this is an invalid metric (CWG 10.2) since it measures the growth of the economy not the frequency of extreme weather, and indeed NOAA has withdrawn the data product. Even though it was still distributed by NOAA at the time of the NCA5, the report authors should have assessed it skeptically and seen that it was unfit for the purpose of measuring climate trends.

Page 23 states, in large font:

Climate changes are making it harder to maintain safe homes and healthy families; reliable public services; a sustainable economy; thriving ecosystems, cultures, and traditions; and strong communities.

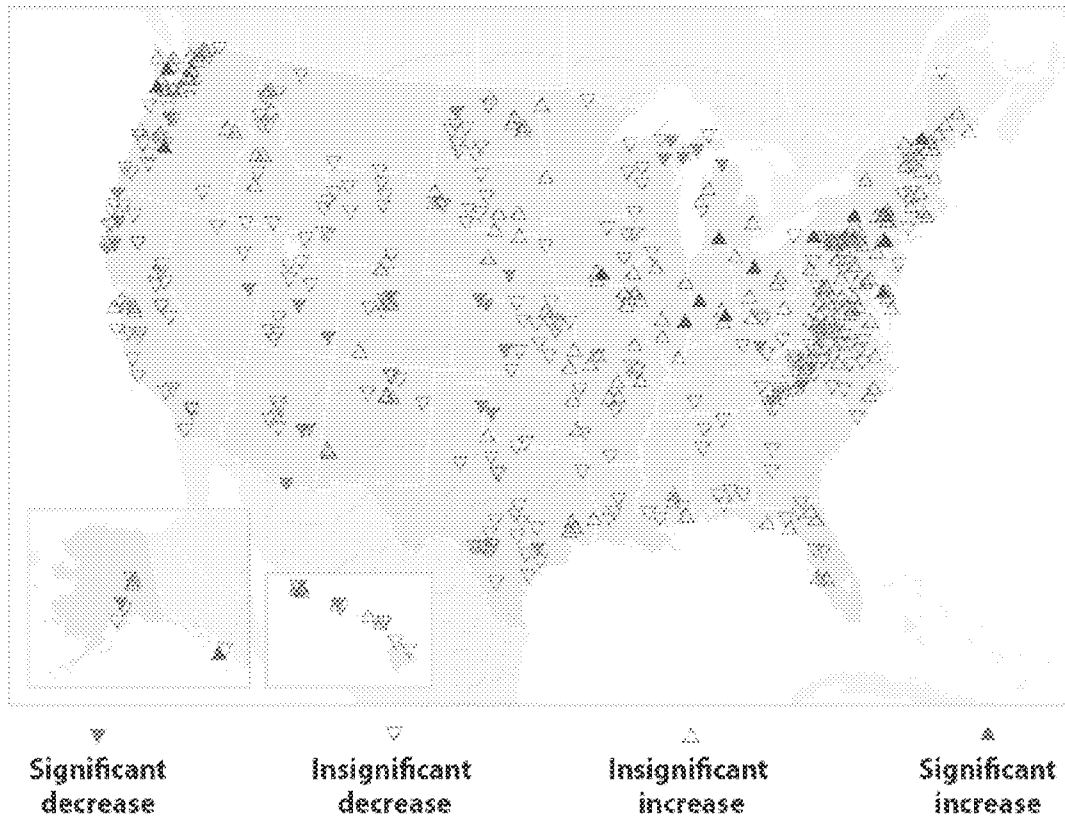
It is pointless to try to evaluate this statement on scholarly grounds; it is self-evidently hyperbolic. This kind of language doesn’t belong in a scientific assessment report. Its prominent inclusion points not only to the willingness of NCA5 authors to promote hysteria, but also the ineffectiveness of the review process at not ensuring such statements are removed.

We won’t try to cite all the remaining examples of advocacy and hyperbole in the Overview chapter; one more example will suffice. Page 26 states “Increasing flooding puts more people and assets at risk.” The accompanying figure contrasts model-projected flood losses by county in 2050 to that observed in 2020 as estimated in Wing *et al.* (2022)¹. Hence the evidence for the claim is not currently-observed trends, it is a model-generated projection of changes. But current trends in U.S.-based flooding reveal a more complex picture with a general overall trend towards less flooding. The Environmental Protection Agency’s “Climate Change Indicators: River Flooding” webpage² shows maps both of flood magnitude and frequency. Both show more regions experiencing declines over

¹ Wing, Oliver, William Lehman, Paul Bates *et al.* (2022) Inequitable patterns of US flood risk in the Anthropocene. *Nature Climate Change* 12 156—162 <https://www.nature.com/articles/s41558-021-01265-6>

² <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-river-flooding>

1965-2015 than increases. Hence current trends indicate generally declining U.S. flood risks, but the NCA5 Overview not only fails to mention this but declares the opposite based on a single study presenting model-generated forecasts of flood activity decades in the future.



U.S. Flood magnitude trends 1965-2015.

Source: <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-river-flooding>

3 OVERCONFIDENCE WHEN STATING CONCLUSIONS

3.1 Inflated certainty levels

A general pattern in the NCA5 is overconfidence in stating conclusions. The authors frequently make sweeping generalizations without appropriate caveats or acknowledging uncertainties. The overconfidence begins with inflated certainty levels.

The NCA5 uses specific terms to convey information about scientific confidence associated with important finds, observations and projections. The Front Matter of the NCA5 states that “confidence in a finding is based on the type, amount, quality, strength, and consistency of evidence; the skill, range, and consistency of methods to detect, evaluate, attribute, and interpret climate trends; and the degree of agreement across scientific information sources.”

Table 1 provides calibrated language for confidence assessment:

Very high:	Strong evidence (established theory, multiple sources, well documented and accepted methods, etc.). High consensus
High:	Moderate evidence (several sources, some consistency, methods vary and/or documentation limited, etc.). Medium consensus
Medium:	Suggestive evidence (a few sources, limited consistency, methods emerging, etc.) Competing schools of thought.
Low:	Inconclusive evidence (limited sources, extrapolations, inconsistent findings, poor documentation and/or methods not tested, etc.). Disagreement or lack of opinions among experts.

This terminology is inflated: *high confidence* with just moderate evidence and medium consensus; *medium confidence* with only suggestive evidence and competing schools of thought. This inflation in terminology leads to overconfidence in the conclusions.

Even within the context of this inflated terminology, NCA5 further inflates the confidence level of many of its conclusions to well beyond what the IPCC has concluded with more thorough justification, and also by incorrectly applying its own standards. Several illustrative examples are provided.

Key Message 3.1 Traceable Account states: “There is *very high confidence* that emissions of GHGs from human activities, fossil fuel use in particular, have unequivocally caused *all* global warming observed over the industrial era.” Compare this statement with statements from the IPCC AR5 and AR6:

AR5: “It is *extremely likely* that *more than half* of the observed increase in global average surface temperature from 1951 to 2010 was caused by the anthropogenic increase in greenhouse gas concentrations and other anthropogenic forcings together.” (IPCC, 2013)

AR6: “The *likely* range of total human-caused global surface temperature increase from 1850–1900 to 2010–2019 is 0.8°C to 1.3°C, with a best estimate of 1.07°C. It is *likely* that well-mixed GHGs contributed a warming of 1.0°C to 2.0°C, other human drivers (principally aerosols)

contributed a cooling of 0.0°C to 0.8°C, natural drivers changed global surface temperature by –0.1°C to +0.1°C, and internal variability changed it by –0.2°C to +0.2°C. It is *very likely* that well-mixed GHGs were the main driver of tropospheric warming since 1979.” (IPCC, 2021)

The IPCC AR5 and AR6 statements provide likelihood assessments but not a confidence level. While the NCA5 claims with *very high confidence* that fossil fuels have unequivocally caused *all* global warming, the AR5 refers to “*more than half* of the observed warming” and the AR6 provides a more nuanced statement that relates to a *likely* range of warming contributed to by human drivers.

NCA5 Key message 2.2: “Hurricanes have been intensifying more rapidly since the 1980s (*high confidence*) and causing heavier rainfall and higher storm surges (*high confidence*).” No justification is provided in Chapter 2 for the *high confidence* conclusion on higher storm surges or hurricanes causing heavier precipitation. The Traceable Accounts section, Description of Confidence and Likelihood states: “Basic physical understanding and climate models both provide robust explanations for the links between climate change and observed changes in these extremes: this is why the authors also have *high confidence* that storms are delivering more rainfall and high confidence that storm surges are becoming higher.” In short, the NCA5 provides no observational basis or published research for their *high confidence* assertions that hurricanes are causing heavier rainfall and higher storm surges; and does not meet its own standards for a *high confidence level*.

3.2 Range of climate sensitivity

Chapter 3 (Earth System Processes) states, on page 3-10, Key Message 3.2: “The Estimated Range of Climate Sensitivity Has Narrowed by 50%”. Referring to Equilibrium Climate Sensitivity (ECS) the section elaborates:

Recent improvements in the understanding of how climate feedbacks vary across timescales have narrowed the estimated *likely* range of warming expected from a doubling of atmospheric carbon dioxide by 50% to between 4.5°F and 7.2°F (*high confidence*).... This uncertainty reduction results from advances in combining observations and targeted modeling results from nearly independent lines of evidence, each of which generally agrees on the values of ECS. The lines of evidence include 1) observed present-day variations on monthly to interannual timescales from which cloud and other climate feedbacks are inferred; 2) observed temperature changes between the preindustrial period and present and associated relationships to ERF; and 3) estimated temperature and radiative forcing changes for multiple warm and cold periods in paleoclimate records.

The graphic summary on page 3-11 states

The reduced uncertainty in climate sensitivity and climate feedback has been achieved through unprecedented quantitative synthesis of evidence from observed changes over recent decades, the industrial era, and paleoclimate.

This is a grossly inadequate description of the situation. The key development in AR6 was a *reduction* of confidence in the ability of climate models to identify ECS and the shift away from the model-based method the IPCC had relied on since AR1 in 1990. The IPCC instead turned to data-driven ECS

estimation and specifically chose a single paper from the scientific literature, Sherwood *et al.* (2020³) for the purpose. It combined paleoclimate data, modern instrumental data and modern observations of climate processes, mainly cloud-related, that govern key feedbacks. Sherwood *et al.* used a subjective Bayesian method to determine the likely range of ECS values. The Bayesian approach begins with the researcher specifying a “prior”, namely an expectation of the likely distribution of answers before seeing the data. In this case the prior consists of an expected ECS range based on the researchers’ subjective beliefs. Then the data are allowed to influence the ECS distribution and the final result is a weighted average of the assumed prior and the data-driven result. Sherwood *et al.* found a best (or median) ECS estimate of 5.4°F (3°C), which was close to previous model-based estimates but raised the likely lower bound by 1.7°F from 2.5°F to 4.2°F. The IPCC accepted this result and increased the best estimate to 3.1°C.

The NCA5 was published in November 2023. Well before that, in September 2022, Lewis (2023) had been published online at *Climate Dynamics* presenting a forceful critique of Sherwood *et al.*⁴ One of Lewis’ points was that Sherwood *et al.*’s result was dependent on their chosen subjective prior. Lewis recommended using an objective Bayesian method, which places primary weight on the data rather than the researcher’s expectation. Using that and updated forcing data from AR6, Lewis estimated an ECS best estimate of 4.0°F (2.2°C) with a likely lower bound of 2.9°F (1.6°C).

Hence, in contrast to the promotional language of Chapter 3 a more valid summary of the ECS literature as it stood at the time of writing the NCA5 would be what we wrote in CWG25 (emphasis added):

For the AR6, the IPCC placed primary weight on the results of Sherwood *et al.* (2020) that combined historical and paleoclimate proxies with the process-based approach and yielded a best estimate of 3.1°C with a *likely* range of 2.6-3.9°C. Lewis (2022) raised a number of concerns about this result, including methodological errors, outdated input values, and use of subjective versus objective Bayesian priors in the analysis. Lewis’ analysis found that climate sensitivity is estimated to be much lower and better constrained than in the Sherwood *et al.* analysis – median 2.2°C (1.8–2.7°C in the 17–83 percent *likely* range, and 1.6–3.2°C in the 5–95 percent *very likely* range). **The IPCC AR6 estimated only a 5 percent probability that ECS was below 2.3°C, whereas Lewis estimated it to be over 50 percent.** The most recent publications on the debate between Sherwood *et al.* and Lewis further defend their respective positions: Sherwood and Foster (2024) and Lewis (2025).

3.3 New emission scenarios as a scientific “advance”

Chapter 3 pp. 13-14 treats the release of new emission scenarios as a scientific “advance” without addressing the failure of many previous scenarios to match reality or providing an honest assessment of the likelihood that the new ones remain biased in the same way.

³ Sherwood, S. C., Bony, S., Boucher, O., Bretherton, C. S., Forster, P. M., Gregory, J. M., & Stevens, B. (2020). An assessment of Earth’s climate sensitivity using multiple lines of evidence. *Reviews of Geophysics*, 58(4). <https://doi.org/10.1029/2019rg000678>

⁴ Lewis, N. (2023). Objectively combining climate sensitivity evidence. *Climate Dynamics*, 61(9–10), 3155–3163. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06398-8>. The final citation for this paper is Lewis (2023) because the print edition did not appear until 2023, but the article was accepted in August 2022 and the online edition appeared and was in circulation in September 2022.

Key Message 3.3 states “New Data and Analysis Methods Have Advanced Climate Science” and includes the following:

New scenarios of socioeconomic development, and their associated emissions and land-use changes, drive updated climate projections from Earth system models. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) organized the main set of 21st-century projection experiments under the latest phase of the Coupled Model Intercomparison Project, CMIP6. These CMIP6 projections used newly developed scenarios based on Shared Socioeconomic Pathways (SSPs; Figure 3.4). Five SSPs represent alternative plausible trajectories of 21st-century GDP and population growth and the pace and pervasiveness of socioeconomic and technological progress within individual nations and across the world (see Table 3 in the Guide to the Report). SSP-specific drivers are used in integrated assessment models (IAMs) to simulate the corresponding evolution of the energy system and the resulting greenhouse gas trajectories. These are in turn used by ESMs to drive their 21st-century projections.

There is nothing wrong with NCA5 discussing the development of new emission scenarios which serve as inputs to climate change projections and impact studies. But it is a serious omission not to inform the reader of the failure of many previous IPCC scenarios to match reality and the tendency of the scenario groups to exaggerate near-term and long-term CO₂ concentration growth (CWG25 3.2.1). It is also a serious omission not to caution readers that many climate impact studies use RCP8.5 which by the time of NCA5 had already been heavily criticized in the literature.

The same section also reports the availability of new and larger model ensembles as a scientific advance, without addressing ways in which models are getting worse in some key respects (CWG Ch 5).

3.4 “Emergent Constraints” and uncertainty in climate projections

Chapter 3 page 17 presents the topic of “emergent constraints” in uncritical terms:

An approach to reduce uncertainty in climate change projections has matured over the past decade. It is known as “emergent constraints.” The term refers to strong statistical relationships between highly uncertain future climate parameters and observable trends or variations in the current climate, along with a physical explanation of this relationship.

Emergent constraints appeared in the climate modeling literature as a way to tie GCM behavior to climate observations in hopes of generating insight into real-world ECS. Climate models exhibit a wide range of sensitivities. The idea of emergent constraints is to examine whether the models with shared sensitivity values also share a common representation of some climate process (usually related to clouds) that might indirectly influence ECS. Suppose, for instance, that in low-ECS models the total cloud fraction in the tropics is strongly correlated with that in the southern midlatitudes but in high-ECS models the correlation is weak. Then researchers could check if the observed correlation is strong or weak and draw a conclusion about which type of model, and therefore which ECS value, is more likely.

A problem in the emergent constraint literature is that there has been a large proliferation of proposed correlations with little physical motivation. Many emergent constraints patterned on

CMIP5 models failed to work on CMIP6 models (Schlund *et al.* 2020)⁵. In other words, the observed correlations in CMIP5 models between ECS and cloud processes failed to show up in CMIP6 models, indicating that they were likely spurious rather than clues to physical processes governing the Earth climate system. The result was that emergent constraints estimated on CMIP5 models widened the range of estimated ECS values when applied to CMIP6 models.

Schlund *et al.* summarized the problem as follows:

In this study, we systematically analyze 11 published emergent constraints on ECS that have mostly been derived from models participating in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) project... The focus of the study is on testing if these emergent constraints hold for [Earth System Models] participating in the new Phase 6 (CMIP6). Since none of the emergent constraints considered here have been derived using the CMIP6 ensemble, CMIP6 can be used for cross-checking of the emergent constraints on a new model ensemble. **The application of the emergent constraints to CMIP6 data shows a decrease in skill and statistical significance of the emergent relationship for nearly all constraints, with this decrease being large in many cases.** Consequently, the size of the constrained ECS ranges (66% confidence intervals) widens by 51% on average in CMIP6 compared to CMIP5.

Yet NCA5 described the use of emergent constraint analysis as a great “advance” that reduced uncertainty.

3.5 Increasing hurricane intensity

NCA5 Key message 2.2 states

Hurricanes have been intensifying more rapidly since the 1980s (*high confidence*) and causing heavier rainfall and higher storm surges (*high confidence*).

No justification is provided in Chapter 2 for the *high confidence* conclusion on higher storm surges or hurricanes causing heavier precipitation. The Traceable Accounts section, Description of Confidence and Likelihood states:

Basic physical understanding and climate models both provide robust explanations for the links between climate change and observed changes in these extremes: this is why the authors also have *high confidence* that storms are delivering more rainfall and high confidence that storm surges are becoming higher.

In short, the NCA5 provides no observational basis or published research for their *high confidence* assertions that hurricanes are causing heavier rainfall and higher storm surges; and does not meet its own standards for a *high confidence level*.

⁵ Schlund, Manuel, Axel Lauer, Pierre Gentine, Steven C. Sherwood, and Veronika Eyring (2020) Emergent constraints on equilibrium climate sensitivity in CMIP5: do they hold for CMIP6? *Earth System Dynamics* 11 1233-1258 <https://doi.org/10.5194/esd-11-1233-2020>

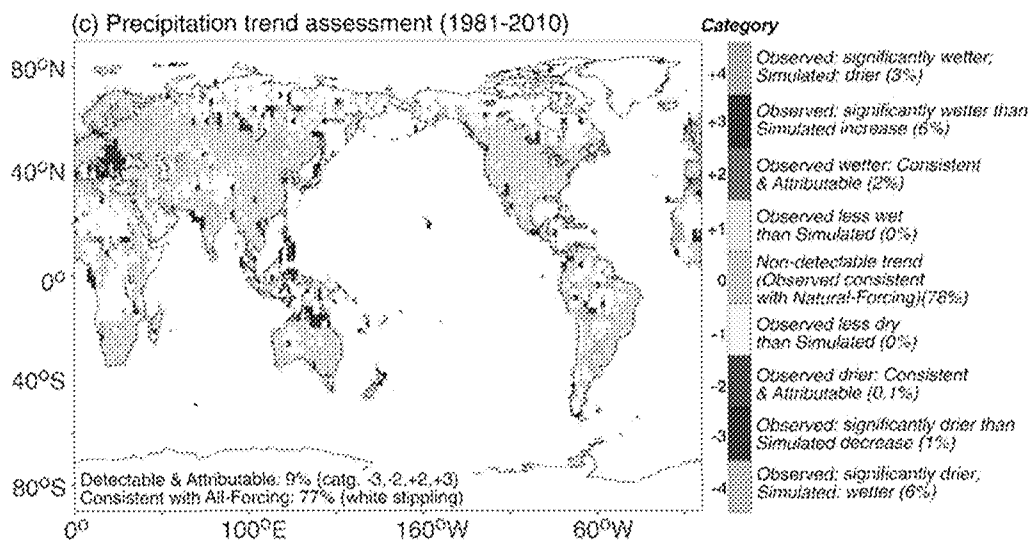
3.6 Overstating findings in underlying sources

Although we did not do a detailed audit of the NCA5's use of source material, a few spot checks turned up evidence of a pattern of overstatement.

Chapter 2 page 11 reports on an increase in precipitation in central and eastern US based on a comparison of 2002-2021 average rainfall to the average over 1901-1960. Note that this is a non-standard metric; we will discuss NCA5's inconsistent choices of time scales of analysis below. The change in this case is called a "trend" even though this is not how a trend is measured, and says that it is "attributable to climate change". The claims were attributed to the following paper:

- Knutson, Thomas and Fanrong Zeng (2018) "Model Assessment of Observed Precipitation Trends over Land Regions: Detectable Human Influences and Possible Low Bias in Model Trends" *Journal of Climate* 31(12)
<https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/31/12/jcli-d-17-0672.1.xml>

But Knutson and Zeng did not say these things. It examined linear trends over 1901 – 2010, 1951 – 2010 and 1981 – 2010. It did not compare average rainfall over 2002 - 2021 to average rainfall over 1901 – 1960, indeed it was published in 2018 so it could not have. With regard to 1981-2010 trends its results were summarized in the following figure:



Gray indicates no trends detected. Stippling means that there were no trends in the models either so the models and observations agreed in that respect. Detectable and attributable trends were found over only 9% of the land surface of the Earth. Over the US there are detectable trends over only a few regions in the Southwest.

Chapter 2 page 18 states

There is robust evidence that human-caused warming has contributed to increases in the frequency and severity of the heaviest precipitation events across nearly 70% of the US.

This is attributed to two papers:

- Diffenbaugh, N.S., D. Singh, and J.S. Mankin, 2018: Unprecedented climate events: Historical changes, aspirational targets, and national commitments. *Science Advances*, **4** (2), 3354. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao3354>

and

- Kirchmeier-Young, M.C. and X. Zhang, 2020: Human influence has intensified extreme precipitation in North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **117** (24), 13308-13313. <https://doi.org/10.1073/pnas.1921628117>

Diffenbaugh et al. presented ratios of observed occurrences of extreme events to simulated occurrence rates in CMIP6 models run with only natural forcings. They report that for 79% of the U.S. extreme rainfall event frequencies are currently higher than in model simulations, and the ratio of occurrences will rise under future warming simulations. This is not “robust” evidence of anthropogenic influence since it requires readers to assume that climate models provide accurate simulations of regional precipitation patterns, something which even the IPCC AR6 admits is uncertain (AR6 WGI SPM Box SPM 1.2, SPM Section C.1.3).

Kirchmeier-Young and Zhang looked at extreme 1- and 5-day events in North America and, using 3 GCMs, found “A signal of combined anthropogenic and natural external forcing can be detected in the intensification of extreme precipitation at the continental scale over North America. In some cases, this intensification can be attributed to human influence specifically.” However, they noted large differences among the three models in their simulated precipitation changes. Also, 2 of the 3 models failed to yield detection for Rx5Day for the North America mean. Finally, the authors used Total Least Squares, an estimation method known to overstate signal detection results (CWG Section 8.3.2). Here again this is not “robust” evidence, it is suggestive but other studies have found natural variability predominant. Both cited references utilized the implausible RCP8.5 scenario and began their “historical” observational records only in 1961.

4 RELIANCE ON *Ad Hoc* TIME SCALES FOR TREND ANALYSIS

In CWG25 Chapter 6 we discussed the need to be careful regarding the choice of time scale when making claims about trends in extreme weather. We gave examples from analysis of river flooding (6.1), heatwaves (6.3) and extreme precipitation (6.4) to show how assertions about apparent trends based on short data sets fall apart when looking at longer versions of the same data sets. Here we elaborate on these examples to illustrate a general point that NCA5 made inconsistent and *ad hoc* choices about time scales of analysis, weakening the validity of their conclusions.

4.1 Average and Extreme Precipitation

McKittrick and Christy (2019)⁶ showed that apparently significant positive trends in U.S. average and extreme precipitation over the NCA4 interval (1901 – 2016) disappeared on longer samples (extending back as far as the 1840s depending on location or on a shorter interval coinciding with the final 40 years of the data then available (1978 – 2017).

In CWG Section 6.4 we presented analysis of updated data for the same locations and many more besides, in all cases finding considerable regional heterogeneity and lack of robustness of trends to use of long samples.

NCA5 did not continue the NCA4 precedent of using the post-1901 interval as the time scale for its precipitation discussion, instead it refers to changes “since the 1950s” which we take to mean 1950 onwards though NCA5 Fig. 2.8 suggests 1958 as the start date. For the present report we have extended the analysis even further now to include 141 stations across the US in the Pacific Coast, Midwest, Northeast and Southeast regions. We provide details in the Appendix; here we note merely that once again it is possible to find trends that support the NCA5 position, but they are not robust to selecting longer or shorter time scales of analysis. Data from 1950 to 2024 yields many indications of increased average and extreme precipitation at individual stations and region-wide averages. But when using the entire data set (back to the 1890s or earlier depending on location) or the later subset (1980 to 2024) the trends become smaller, in many cases they become statistically insignificant, and occasionally they change sign. Only in the Northeast region are the post-1950 trends robust to focusing on the post-1980 interval.

Under Key Message 2.2 “Extreme Events Are Becoming More Frequent and Severe” (p. 2-16) NCA5 states (p. 2-18):

“Rainfall is becoming more extreme”

Since the 1950s, there has been an upward trend in heavy precipitation across the contiguous US. This increase is driven largely by more frequent precipitation extremes, with relatively smaller changes in their intensity. The largest increase in the number of extreme precipitation days (defined as the top 1% of heaviest precipitation events) has occurred over the Northeast (an increase of around 60%) and Midwest (around 45%), along with increases of more than 10% in their annual and 5-year maximum amount

⁶ McKittrick, R., and J.R. Christy (2019). Assessing changes in US regional precipitation on multiple time scales. *Journal of Hydrology*, 578, 124074. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124074>

(Figure 2.8). These changes have contributed to increases in river and stream flooding in these regions. The increase in frequency and intensity of precipitation extremes is evident across a broad range of event durations (from 1 to 30 days) and return intervals (1 to 20 years), particularly east of the Rocky Mountains.

There is robust evidence that human-caused warming has contributed to increases in the frequency and severity of the heaviest precipitation events across nearly 70% of the US. Paleoclimate records derived from tree-ring growth provide evidence that summer moisture has increased over the past century in parts of New England, the central-eastern US, and the northern Mississippi River valley.

The following is a more accurate summary of what U.S. data show.

There are regionally-heterogeneous changes in average and extreme precipitation. Positive trends in annual average rainfall and extreme events (defined either as the annual maximum or the number of exceedances of the 99th percentile value) are generally weak or non-existent when looking at samples exceeding 130 years in length. Significant trends can be found when beginning the sample in the 1950s although in most cases the trends weaken and become insignificant when looking at the post-1980 interval. This makes attribution to anthropogenic warming difficult.

Along the Pacific coast very few stations (1 or 2 out of 29) exhibit significant trends on any time scale in any metric and the region-wide trends are insignificant. In the Southeast region about 5 out of 24 stations exhibit positive trends in average and extreme precipitation metrics and the regional trends are likewise significant, but only on samples beginning in 1950. When the sample starts in 1873 or 1980 the trends weaken and become mostly insignificant. In the Midwest region nearly half the stations exhibit positive and significant trends in average precipitation since 1893 (23/61) and 1950 (28/61) but the trends weaken after 1980: only 6/61 locations are significant and the region-wide trend is insignificant. These positive trends reflect the dryness of the 1930's Dust Bowl era. Regional trends in max and 99th percentile exceedances are insignificant post-1893 and -1980 but the latter are positive and significant post-1950.

In the Northeast region 12 out of 27 stations exhibit positive and significant increases in average precipitation post-1888, post-1950 and post-1980 (10/27) and the regional trend is positive and significant in all three intervals. The regional number of 99th percentile exceedances has a positive trend post-1950 and post-1980 but not post-1888. The significant positive trends post-1980 are concentrated in NH but are insignificant elsewhere.

Consequently, precipitation in the U.S. exhibits considerable regional and temporal variability. Relatively more places became wetter than drier. In the Midwest and Northeast the general pattern since 1950 favors increased precipitation depending on the location, although trends since 1980 have not tended to be statistically significant.

4.2 Heatwaves

- details; NCA4 used entire 20th century while NCA5 looked at post-1960 interval

5 INADEQUATE TRACEABLE ACCOUNTS

- details

6 OVEREMPHASIS ON EXTREME SCENARIOS

To respond to the GCRA mandate to “project major trends for the subsequent 25 to 100 years,” the NCA relies on projections of future climate change based on estimates of future emissions (the so-called SSP scenarios) and/or specified levels of radiative forcing (the RCP scenarios). For the most part, NCA5 uses scenarios developed for the IPCC Assessment Reports.

In CWG Section 3.2.1 we presented a critical assessment of past and current IPCC scenario envelopes, showing that they have tended to overshoot observed emissions. In 2021, UN Climate Negotiators (COP) stopped using scenarios above 4.5. The IPCC AR6 published in 2021 stated that “The likelihood of high-emission scenarios like RCP8.5 and SSP5-8.5 is considered low in light of recent energy sector developments.” NCA5 makes the following observations about the scenarios they use:

NCA5 authors were advised to assess the full range of scenarios available. (Front Matter)

Scenarios of future emissions and land-use change are developed as plausible alternatives, but no relative likelihood is attached to them. Some recent studies, however, have argued that the highest scenario, SSP5-8.5, is no longer plausible without a reversal of current trends in the adoption of renewables and energy efficiency. (Key Message 3.3 Traceable Analysis)

Despite acknowledging the issue the NCA5 otherwise ignored the problem. A keyword search of the NCA5 of mentions of RCP/SSP scenarios finds over 50% referred to the extreme emissions scenarios RCP8.5/SSP5-8.5. Further, 10 figures only included the 8.5 scenarios: 5.2, 6.9, 7.4, 11.3, 14.6, 22.13, 22.19, 27.9, 29.13.

The problem of relying on extreme scenarios is particularly acute for sea level rise projections. The sea level rise scenarios used in the NCA5 do not relate directly to the SSP emissions scenarios, but to specified amounts of sea level rise by 2100, whereby Low relates to 0.3 m (0.98 feet), Intermediate-Low relates to 0.5 m (1.64 feet), Intermediate relates to 1.0 m (3.28 feet), Intermediate-High relates to 1.5 m (4.92 feet), and High relates to 2.0 m (6.56 feet). (Table 4 of Guide to Using this Report).

Considering only projections representing processes in whose quantification there is at least medium confidence, the IPCC AR6 assessed global mean sea level projections for 2100 to fall between 0.2 and 1.6 m (5th—95th percentile range). The corresponding range of sea level rise scenarios considered by the NCA5 is from 1.5 to 2.0 m. NCA5 neglects to include plausible lower scenarios, such as 0.2 m cited by the IPCC, which also corresponds to the average rate of sea level rise over the past century.

With regards to actual predictions of sea level rise, Chapter 9 of the NCA states: “Under a range of potential global warming levels, average sea level along US coastlines is *likely* to be between 12 and 20 inches above 2000 sea levels in 2050.” These values of sea level rise encompass the Intermediate scenario to values slightly higher than the High scenario from Table 4 << which Table 4?.

Global sea level rise projections to 2050 relative to a 2000 baseline can be evaluated with respect to the observed global sea level rise from 2000-2024, which is approximately 3.39 inches (0.28 feet). <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level> Hence it is inferred that NCA5 is projecting values of sea level rise between 2025 and 2050 that are 3.5 to 5.8 times the rate observed during 2000-2024.

Chapter 9 further states: “Looking toward the future, an 11 inch (28 cm) average rise along the contiguous US coastline is expected by 2050 (relative to 2020), with a *likely* range of 9-13 inches.” This analysis accounts for the observed sea level rise between 2000 and 2020.<< But they say it’s relative to 2020.

With regards to confidence levels, NCA5 Chapter 9 Traceable Accounts states: “There is *high confidence* and it is *likely* that sea levels will rise about 11 inches (likely range of about 9–13 inches) between 2020 and 2050” Neither the statement nor the context in the paragraph distinguishes as to whether this refers to global sea level rise, or US average sea level rise, although it is inferred to refer to global sea level rise.

In summary, the NCA5 presents future sea level rise scenarios that are not directly relatable either to SSP/RCP emissions scenarios or global warming levels. The NCA5 scenarios include two scenarios that are higher than the 95th percentile for the extreme emissions scenario RCP8.5 and include hypothesized ice sheet processes for which there is low confidence. Projections to 2050 require rates of sea level rise from 2025 to 2050 that are more than three times the rate observed during 2020-2024. Further, the NCA5 ascribes *high confidence* to these sea level rise projections.

The inclusion, and even the focus, on implausible extreme emissions scenarios supports projections of alarming impacts that are very unlikely to be driven by anthropogenic warming.

7 BIASED SELECTION OF REFERENCES

-details

8 SUMMARY: EVALUATION OF THE NCA5

8.1 Pertinent aspects when evaluating in light of statutory requirements

- not our remit to make a ruling but here are aspects to consider in light of statutory requirements

8.2 Evaluation from the perspective of expert users of the report

- we have deep knowledge of the topics surveyed by the NCA5 authors
- we do not have confidence that the report was balanced and comprehensive
- we can point to many specific instances in which the report did not exhibit an appropriate level of quality or integrity as a scientific document
- we have reason to believe the whole process, from author selection to handling of expert reviews, was biased towards reinforcing foregone conclusions and alarmist messaging

8.3 Evaluation from the perspective of citizens interested in good policymaking

- Public concerns about climate change are valid, as are concerns about cost of living, economic growth, employment, etc.
- We share the general concern that elected officials and those who serve them have the best information available when making important decisions around energy and climate policy
- NCA5 was a missed opportunity: it could have been a valuable input to that process but it did not turn out that way
- consequently its usage is unlikely to lead to better decisions and would more likely increase the error rate in policy formation and we recommend it not be used for policymaking purposes.

APPENDIX 1: Seth's letter on statutory requirements for NCA5

APPENDIX 2: Analysis of 141 U.S. Longterm Daily Precipitation Records.

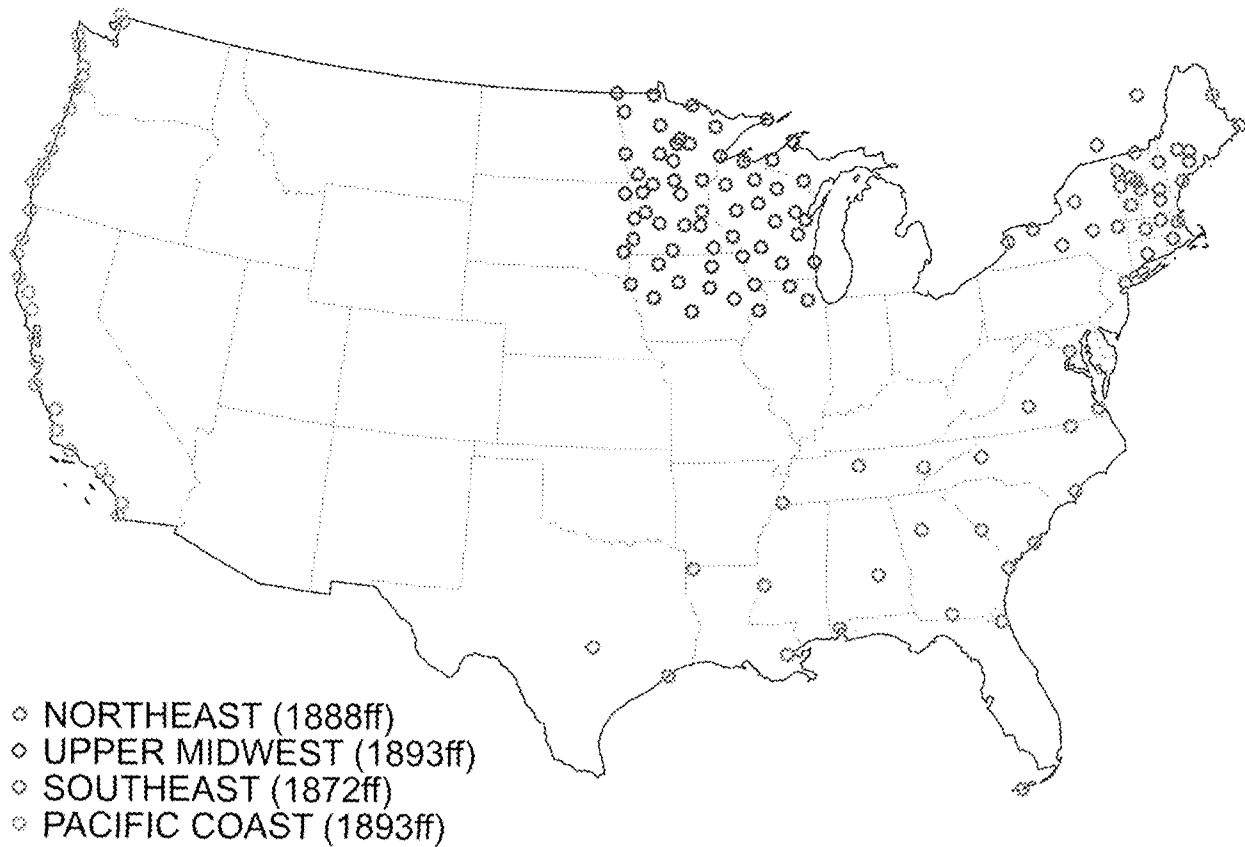


Figure. Stations used in the following analyses.

Table codes: (-) neg insignificant, -- neg significant, (+) pos insignificant, ++ pos significant.

Column 1: Measure

Column 2: Number of stations in that region

Column 3: Count of stations exhibiting a significant positive trend

Column 3: Count of stations exhibiting a significant negative trend

Column 5: Characteristic of region-wide trend

PACIFIC COAST

Since 1893:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	29	0	1	(-)
2-day average	29	0	1	(-)
Avg on non-zero days	29	0	9	--
Variability	29	1	0	(+)
Annual max	29	2	1	(+)

Number of 99 th pct exceedances	29	1	0	(-)
--	----	---	---	-----

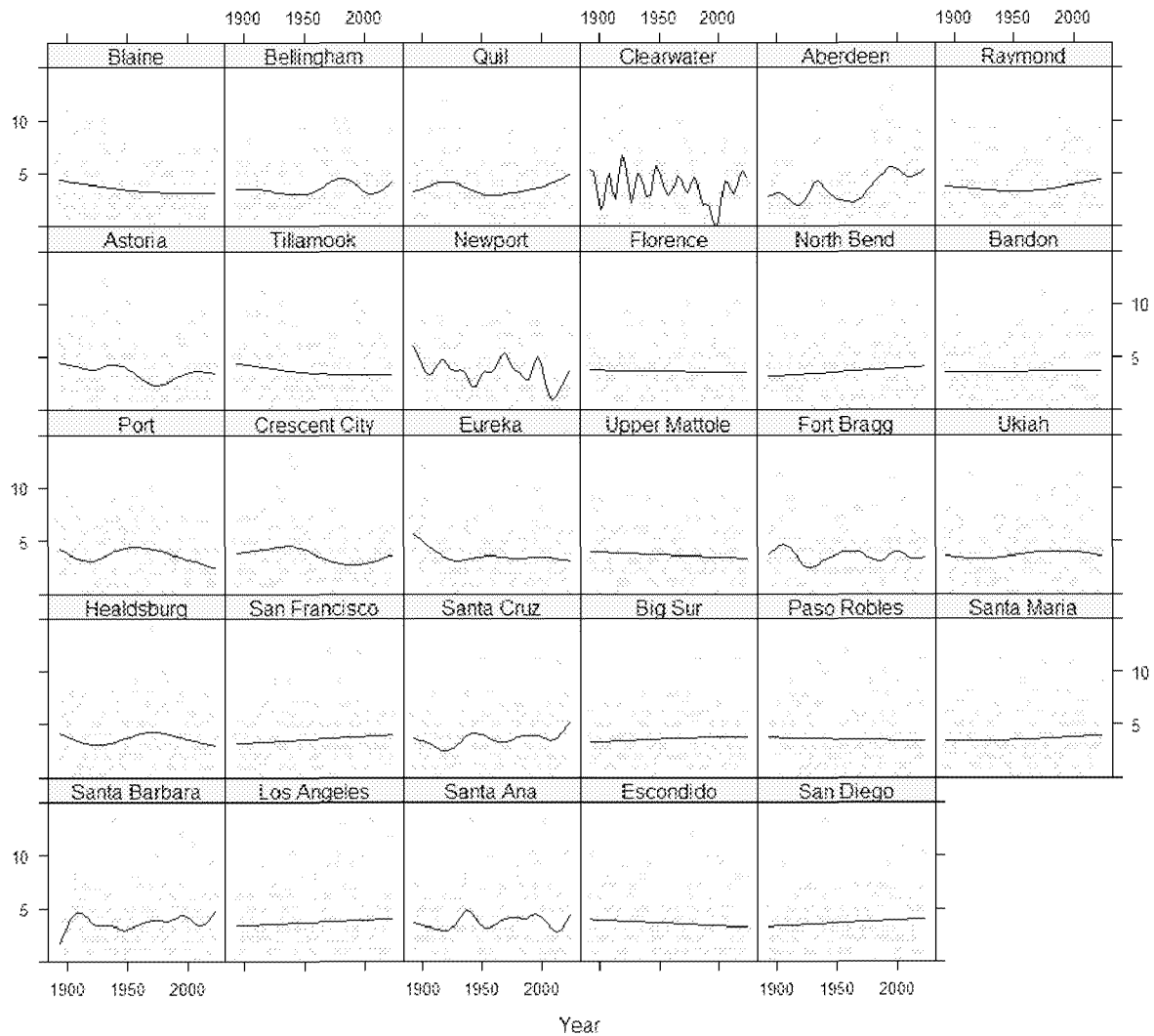
Since 1950:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	29	0	1	(-)
2-day average	29	0	1	(-)
Avg on non-zero days	29	0	4	(-)
Variability	29	2	3	(-)
Annual max	29	6	3	(-)
Number of 99 th pct exceedances	29	2	1	(-)

Since 1980:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	29	0	0	(-)
2-day average	29	0	0	(-)
Avg on non-zero days	29	0	1	(-)
Variability	29	0	0	(-)
Annual max	29	2	1	(-)
Number of 99 th pct exceedances	29	0	0	(+)

Annual No. 99th Percentile Exceedances PC 1893-2024



SOUTHEAST

Since 1873:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	24	1	1	(+)
2-day average	24	1	1	(+)
Avg on non-zero days	24	7	2	(+)
Variability	24	1	0	(+)
Annual max	24	2	0	(+)
Number of 99 th pct exceedances	24	5	0	(+)

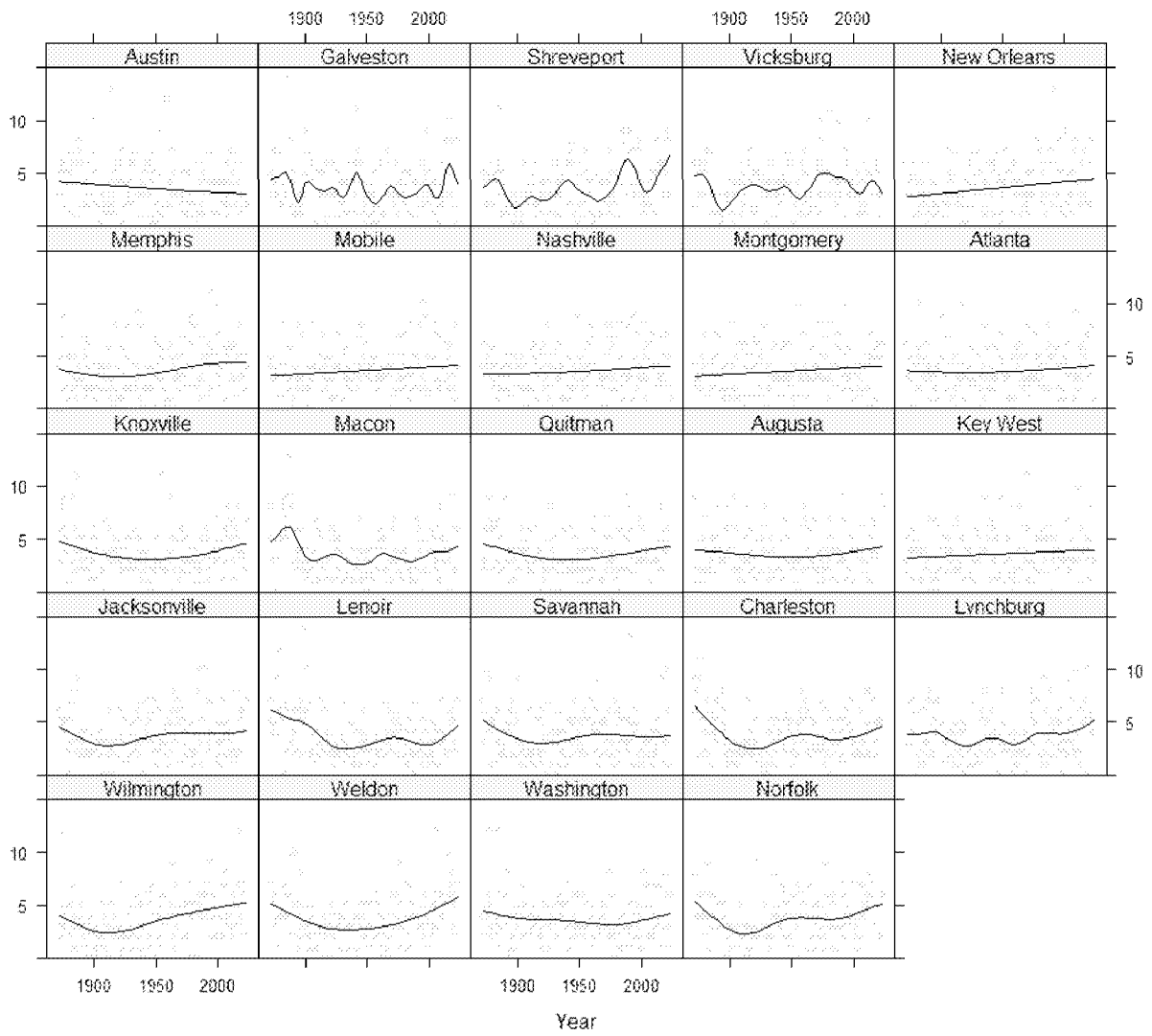
Since 1950:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	24	5	0	++
2-day average	24	5	0	++
Avg on non-zero days	24	5	1	++
Variability	24	6	0	++
Annual max	24	4	0	++
Number of 99 th pct exceedances	24	4	0	(+)

Since 1980:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	24	5	0	(+)
2-day average	24	5	0	(+)
Avg on non-zero days	24	5	1	(+)
Variability	24	3	0	(+)
Annual max	24	4	0	(+)
Number of 99 th pct exceedances	24	4	0	(+)

Annual No. 99th Percentile Exceedances SE 1873-2024



MIDWEST

Since 1893:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	61	23	0	++
2-day average	61	23	0	++
Avg on non-zero days	61	2	12	(+)
Variability	61	12	0	++
Annual max	61	9	0	(+)
Number of 99 th pct exceedances	61	10	0	(+)

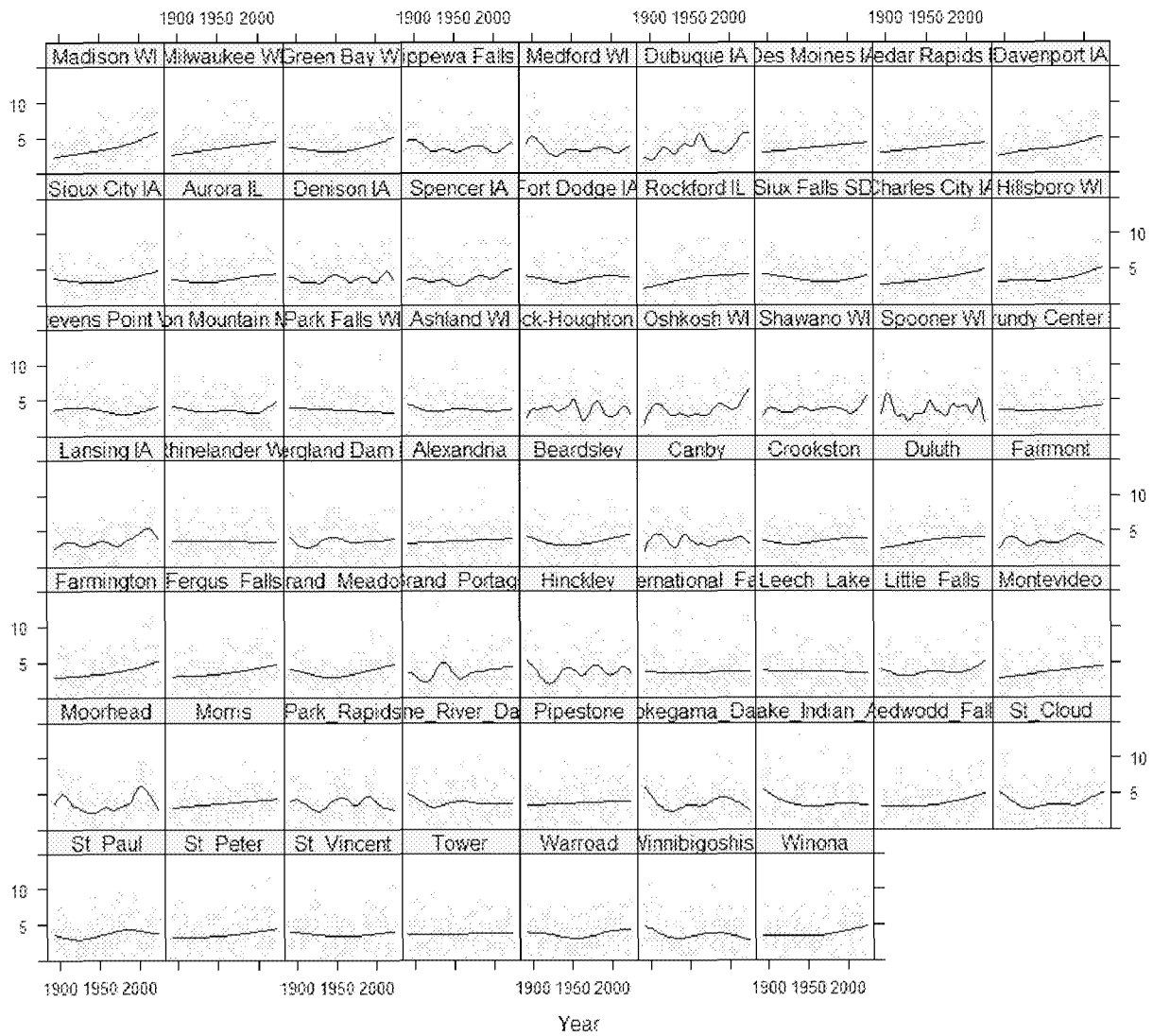
Since 1950:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	61	28	2	++
2-day average	61	28	2	++
Avg on non-zero days	61	11	1	++
Variability	61	16	0	(+)
Annual max	61	8	0	(+)
Number of 99 th pct exceedances	61	19	0	++

Since 1980:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	61	6	1	(+)
2-day average	61	6	1	(+)
Avg on non-zero days	61	8	2	(+)
Variability	61	5	1	(+)
Annual max	61	0	1	(+)
Number of 99 th pct exceedances	61	5	3	(-)

Annual No. 99th Percentile Exceedances MW 1893-2024



NORTHEAST

Since 1888:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	27	12	0	++
2-day average	27	12	0	++
Avg on non-zero days	27	7	1	(+)
Variability	27	4	0	(+)
Annual max	27	3	0	(-)
Number of 99 th pct exceedances	27	5	0	(+)

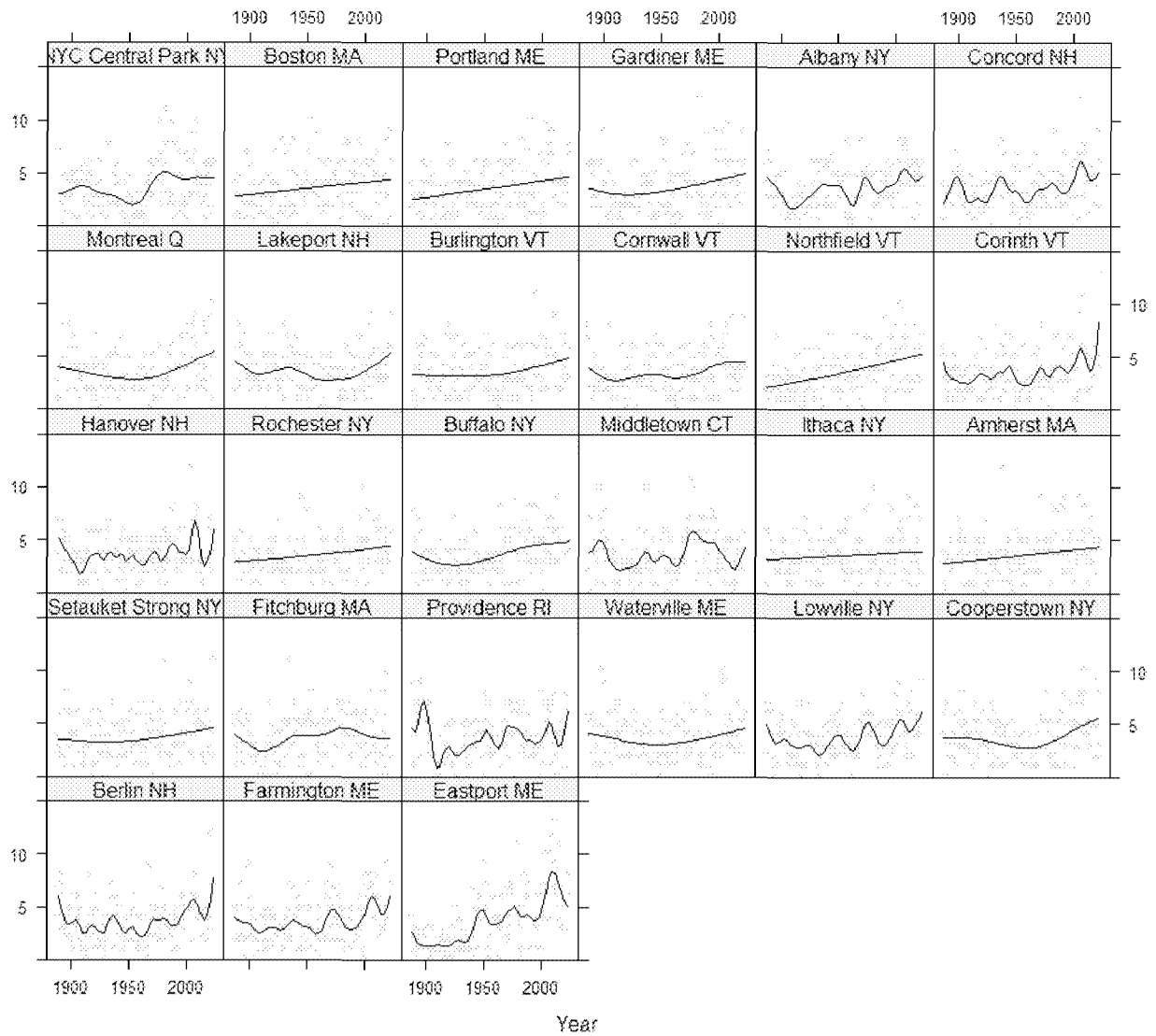
Since 1950:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	27	12	0	++
2-day average	27	12	0	++
Avg on non-zero days	27	7	1	(+)
Variability	27	4	0	(+)
Annual max	27	3	0	(-)
Number of 99 th pct exceedances	27	5	0	++

Since 1980:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	27	10	1	++
2-day average	27	10	1	++
Avg on non-zero days	27	6	0	(+)
Variability	27	2	0	(+)
Annual max	27	1	0	(+)
Number of 99 th pct exceedances	27	1	1	++

Annual No. 99th Percentile Exceedances NE 1888-2024



From: Ross McKittrick [ross.mckittrick@gmail.com]
Sent: 6/13/2025 12:44:17 PM
To: Judith Curry [curry.judith@gmail.com]; Roy W. Spencer [roywspencer@hotmail.com]; John Christy [climatemanager60@gmail.com]; Steven Koonin [steven.koonin@googlemail.com]; Travis Fisher [travis.scott.fisher@gmail.com]; Josh Loucks [loucksj14@gmail.com]
Subject: June 13 edition - for SEK review
Attachments: 01.NCA5.Review.June13.docx

This is the current version for Steve to go through. I've added NASEM review material in Ch 7 currently as a placeholder and we'll work on that stuff offline.

Ross

Review of the Fifth National Climate Assessment

1	INTRODUCTION	2
1.1	ABOUT THIS REPORT	2
1.2	ABOUT THE NATIONAL CLIMATE ASSESSMENTS	2
1.3	STANDARDS FOR ASSESSING NCA PRODUCTS	3
1.4	WHEN PEER-REVIEW FAILS	5
2	NCA5 OVERVIEW CHAPTER: HYPERBOLIC ADVOCACY LANGUAGE AND NON-SCIENTIFIC TONE	9
3	OVERCONFIDENCE WHEN STATING CONCLUSIONS	11
3.1	INFLATED CERTAINTY LEVELS	11
3.2	OVERSTATING FINDINGS IN UNDERLYING SOURCES	12
3.3	TECHNICAL EXAMPLE: EMERGENT CONSTRAINTS	14
4	RELIANCE ON <i>AD HOC</i> TIME SCALES FOR TREND ANALYSIS	16
4.1	AVERAGE AND EXTREME PRECIPITATION	16
4.2	HEATWAVES	17
5	INADEQUATE TRACEABLE ACCOUNTS	20
6	OVEREMPHASIS ON EXTREME SCENARIOS	22
7	INADEQUATE NASEM REVIEW: TO BE ADDED	23
7.1	SUBSTANTIVE CRITICISMS BY NASEM	24
7.2	FAILURES TO CHALLENGE NCA5 FLAWS	24
8	SUMMARY: EVALUATION OF THE NCA5	26
8.1	PERTINENT ASPECTS WHEN EVALUATING NCA5 IN LIGHT OF STATUTORY REQUIREMENTS	26
8.2	EVALUATION FROM THE PERSPECTIVE OF EXPERT USERS OF THE REPORT	26
8.3	EVALUATION FROM THE PERSPECTIVE OF CITIZENS INTERESTED IN GOOD POLICYMAKING	26
	APPENDIXES	27

1 INTRODUCTION

1.1 About this Report

This report responds to a request from OSTP Director Michael Kratsios (reproduced in Appendix XX) that we assess the suitability of the Fifth National Climate Assessment for informing climate and energy policies.

To conduct this assessment we reviewed NCA5 itself, NASEM review of the Third Order Draft and the USGCRP responses to the review. We have drawn upon our long experience working on advisory reports, including for the NASEM, IPCC and other organizations, as writers, reviewers and project leaders.

Our report begins with background on the National Climate Assessments. We then discuss the standards by which we have assessed NCA5, followed by specific deficiencies that we have identified

We find that NCA5 should not be relied on for policy making as it is an incomplete and misleading picture of our understanding of the changing climate and the risks it poses to the nation. NCA5 was selective and incomplete in its survey of the science as of its publication date in 2023 and has become even more so in the years since. We have reviewed many key scientific developments in a separate report to Energy Secretary Wright (Climate Working Group 2025, herein denoted “CWG25”). The overall effect of the biases and omissions of NCA5 is an excessively dire picture of climate risk.

1.2 About the National Climate Assessments

The U.S. Global Change Research Program (USGCRP) was established by Presidential Initiative in 1989 and mandated by Congress in the Global Change Research Act (GCRA) of 1990 to develop and coordinate “a comprehensive and integrated United States research program which will assist the Nation and the world to understand, assess, predict, and respond to human-induced and natural processes of global change.”

The National Climate Assessment (NCA) Reports evolved from the GCRA requirement to

Prepare and submit to the President and the Congress an assessment which (1) integrates, evaluates, and interprets the findings of the Program and discusses the scientific uncertainties associated with such findings; (2) analyzes the effects of global change on the natural environment, agriculture, energy production and use, land and water resources, transportation, human health and welfare, human social systems, and biological diversity; and (3) analyzes current trends in global change, both human-induced and natural, and projects major trends for the subsequent 25 to 100 years.

The five NCA Reports to date have interpreted this mandate in different ways:

- NCA1 (2000) was a multidisciplinary effort to study and portray in regional detail the potential effects of human-induced global warming on the United States.
- NCA2 (2009) was a relatively short report that not only focused on the potential consequences of climate change, but also sought to identify potential adaptation measures and identify the highest priorities for future research.
- NCA3 (2014) was an expanded effort that continued along the lines of NCA2, and was distinguished by a comprehensive review process, including a review by the National

Academy of Sciences. NCA3 introduced a traceability analysis for each key finding, including a description of uncertainties.

- NCA4 (2017/2018) was an expanded effort published in two volumes: I Climate Science Special Report, and II Impacts, Risk, and Adaptation in the United States. This was the first NCA report to devote significant effort to assessing climate science.
- NCA5 (2023) returned to a single volume format, reducing discussion of climate science to a cursory two chapters, with continuing with a focus on regional and sectoral impacts of climate change. NCA5 expanded its remit to topics that are arguably outside the purview of the USGCRP, focusing on “Climate Action” and policy recommendations with a social justice emphasis. NCA5’s self-description is reproduced as Appendix II.

These successive interpretations of the NCA are poorly aligned with the GCRA’s statutory requirements. Only NCA4 gives serious consideration to climate science, which receives the great majority of USGCRP funding, and even then misrepresents some important points. Natural climate variability is essentially dismissed as unimportant in NCA4 and barely mentioned in NCA5 in most contexts, despite the mandate to include both human-caused and natural climate change. Most significantly, NCA5 has redirected the focus away from climate science and even the hazard elements of impacts, towards evaluation of societal vulnerabilities and advocacy for particular policy options, especially wind and solar power. The cover image for the NCA5 Report is the installation of a solar panel.

1.3 Standards for Assessing NCA Products

In Appendix XX we include a letter of guidance from the Office of General Counsel, U.S. Department of Energy, summarizing the extent of statutory requirements governing USGCRP work products in general and NCA products in particular.

We can summarize the standards applicable to the NCA as follows:

- details.

Beyond the statutory requirements we draw attention to two other pertinent standards. President Trump’s executive order of May 23, 2025, “Restoring Gold Standard Science” enumerates some of the characteristics of good science:

- i. reproducible;
- ii. transparent;
- iii. communicative of error and uncertainty;
- iv. collaborative and interdisciplinary;
- v. skeptical of its findings and assumptions;
- vi. structured for falsifiability of hypotheses;
- vii. subject to unbiased peer review;
- viii. accepting of negative results as positive outcomes; and
- ix. without conflicts of interest.

Although these should be self-evident to those trained in science, it is surprising that some have found them controversial.

When scientific reports are being assembled that will be highly influential on climate policymaking there are other desiderata, including statements about the strength of climate knowledge. The IPCC's approach is based on judgment of the available evidence and agreement among experts. More sophisticated knowledge characterizations for risk management include (Aven 2017)¹:

- The degree to which the assumptions made are reasonable/realistic based on background knowledge
- The degree to which data/information exists and are reliable and relevant
- The degree to which there is disagreement among experts (including those from different environments or academic fields)
- The degree to which the phenomena involved are understood and accurate models exist
- The degree to which the knowledge has been thoroughly examined with respect to unknown knowns

Good climate and energy policies will balance the risks and benefits of a changing climate against the world's growing demand for reliable and affordable energy. To strike that balance, policymakers must understand at least two complex and nuanced topics: the certainties and uncertainties of climate science and the technoeconomic realities of energy systems. Experts in those subjects have a unique responsibility to communicate their understanding to non-experts clearly, completely, and without bias.

Expertise in energy systems resides largely in the private sector, where it is essential to providing the reliable and affordable energy services that are the lifeblood of society. Understanding is therefore continually refined and tested by the discipline of the marketplace. In contrast, climate science expertise is found largely in the non-profit realm of universities and government laboratories and so has a more academic character.

In recent decades, climate science has engendered passion and emotion. Indeed, some younger climate scientists have gone into the field to "save the planet." So it is not surprising that objectivity can suffer when climate scientists communicate their understanding to non-experts. Further, the field of climate science has been politicized by NetZero mandates. This lack of objectivity usurps the public's right to make informed choices and undermines their confidence in the scientific enterprise.

In 1980, then-President of the National Academy of Sciences Philip Handler identified the problem in an editorial² that resonates eerily four decades later:

Difficulty arises in the scientific community from confusion of the role of scientist *qua* scientist with that of scientist as citizen, confusion of the ethical code of the scientist with the obligation of the citizen, blurring the distinction between intrinsically scientific and intrinsically political questions. When scientists fail to recognize these boundaries, their own ideological beliefs, usually unspoken, easily becloud seemingly scientific debate.

¹ Aven, Terje (2017) "Improving Risk Characterisations in Practical Situations by Highlighting Knowledge Aspects, with Applications to Risk Matrices," *Reliability Engineering & System Safety* 167 (November 2017): 42–48 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832016306950>

² Handler, Philip (1980) Public Doubts About Science. *Science* 208(4448) p. 1093 <https://www.science.org/doi/10.1126/science.208.4448.1093>

1.4 When Peer-Review Fails

Peer-review of reports like IPCC and NCA products is not a silver bullet that guarantees quality. The peer review process for these reports differs in some important respects from traditional peer review in academic journals. First, NCA reviewers self-select on a volunteer basis whether to provide comments and what parts of the report to read, whereas in academic journals Editors recruit reviewers and assign them to specific papers. There is no guarantee that any particular section of an NCA report was reviewed by anyone, let alone by someone with a different perspective than the authors. This is a problem with NCA and IPCC reports since over the years many potential reviewers have given up making the effort, because their input has systematically been ignored. Second, NCA authors have near complete authority whether to accept or reject review comments. Here, for example, is how a review comment critical of a section of the NCA5 draft was handled by the authors:

By contrast in academic journals the Editor mandates the author to respond and the reviewer gets to assess its adequacy. Once an NCA chapter author team has been selected publication of their work is guaranteed, whereas academic journals routinely reject papers if they do not pass review.

These points are important to bear in mind because some readers might dismiss any criticism of NCA products out of hand on the grounds that they were “peer reviewed”. But the test of a report is whether its contents are a valid representation of the available evidence. Here we give an example in which NCA4 gave prominence to a Figure that completely misrepresented the underlying data and which evaded peer review to do so. Further details can be found in Koonin (2024).

As we pointed out in CWG25 Section 6.3 the number of heat extremes in the U.S. peaked in the 1930s and has declined ever since. Considering cold and hot extremes together the U.S. the U.S. climate has become more moderate over time. NCA4’s Part I (Climate Science Special Report, CCSR) says (prominently and with *Very High Confidence*) on Page 19 of the Executive Summary:

There have been marked changes in temperature extremes across the contiguous United States. The number of high temperature records set in the past two decades far exceeds the number of low temperature records.

and offers this figure in support:

Record Warm Daily Temperatures Are Occurring More Often

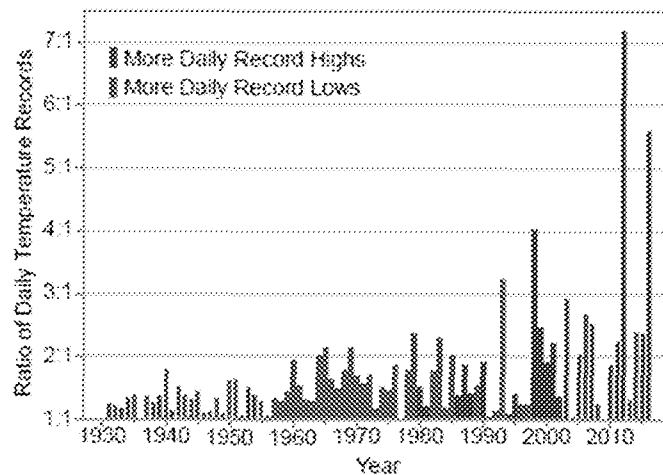
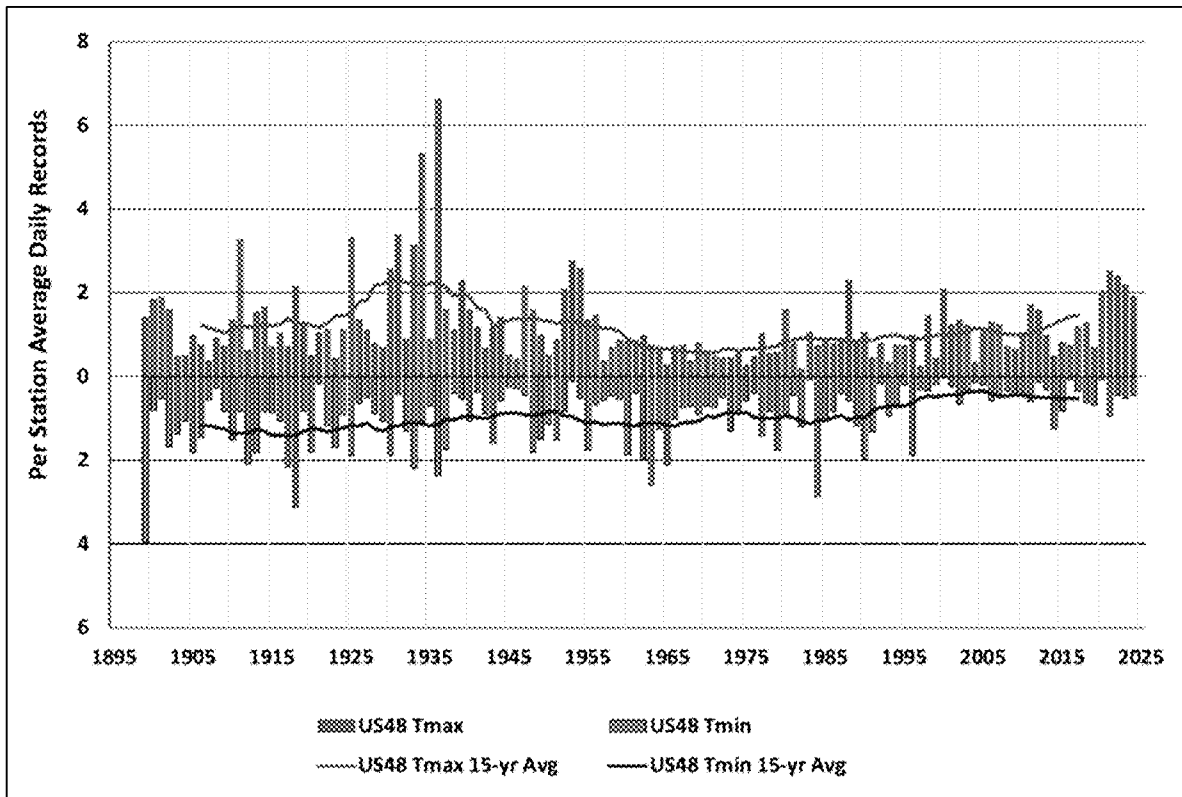


Figure ES.5: Observed changes in the occurrence of record-setting daily temperatures in the contiguous United States. Red bars indicate a year with more daily record highs than daily record lows, while blue bars indicate a year with more record lows than highs. The height of the bar indicates the ratio of record highs to lows (red) or of record lows to highs (blue). For example, a ratio of 2:1 for a blue bar means that there were twice as many record daily lows as daily record highs that year. (Figure source: NOAA/NCEI). From Figure 6.5 in Chapter 6.

The Figure appears to validate the claim that record warm daily temperatures are occurring more often. But the underlying data do not: they show that extreme heat in the U.S. peaked in the 1920s and 1930s and declined thereafter, as NCA4 Figure 6.4 itself later shows.

Figure ES.5 does not show what its title implies: these are not simple counts of cold and warm extreme events; instead they are ratios of the two. In fact, both types of extremes declined over the sample interval, but cold events declined more than warm events, so the ratio of warm extremes to cold extremes increased. By graphing the ratio in this way the NCA4 created a visual impression opposite to what is in the data.

Figure 6.3.3 of CWG25 (reproduced below) shows the results of a proper analysis of the data – defining each record as the singular extreme in the history, displaying numbers of warm and cold records separately, and beginning the analysis in 1899 rather than 1930. It makes evident the exceptional heat of the 1920s and especially the 1930s, peaking in 1936. The increased heat of the past five years is too brief to be deemed climatically significant and, in any event, occurred after the CSSR was published in 2017. The frequency of cold records has declined, especially over the last quarter of the period in which only 13 percent of the extreme cold events were measured. In contrast, 25 percent of the extreme Tmax records were achieved in the last quarter, which is consistent with statistical expectations. As a result, the ratio of heat to cold extremes shown in Figure ES.5 of the CSSR explodes in recent decades. The overall reduction in numbers of both cold and hot extremes over the past century indicates a climate *less* prone to extremes, in sharp contrast to the message of the NCA4 Figure ES.5.



Number of daily record High (red) and Low (blue) temperatures for warm and cold seasons in the CONUS. The lines represent the 15-year running, centered average. Source: 1,211 USHCN stations supplemented as needed to achieve a minimum of 92 percent of observations in the 126-year period since Dec 1898. US48: contiguous U.S. states. Tmax: maximum temperature. Tmin: minimum temperature. Source: CWG25 Figure 6.3.3.

The National Academies' expert review panel criticized the discussion of temperature extremes in a late draft of the CSSR. In reference to the CSSR's Key Finding 2 of Chapter 6, they said:

Further, it is difficult to understand how a statement that includes increases in extreme warmth can be associated with a high confidence or extremely likely statement, given that most of the graphics in this chapter show a decrease in extreme warmth in the historical record.

The Federal official in charge of the CSSR (Michael Kuperberg, Executive Director of the USGCRP) responded to the Academies' review by noting that

Almost every recommendation from the NAS was incorporated [in the final version]... and a new figure was added on changes in record high and low temperatures

The "new figure" referred to is the Figure ES.5, which did not appear in the draft reviewed by the Academies' panel. It seems unlikely that the Academies panel ever saw that figure because they surely would have commented if they had and it wouldn't have survived to publication. And the

figure's problems were evidently not flagged (or were ignored) in the subsequent internal government reviews.

With this background we now present our critique of NCA5.

2 NCA5 OVERVIEW CHAPTER: HYPERBOLIC ADVOCACY LANGUAGE AND NON-SCIENTIFIC TONE

NCA5 Chapter 1 “Overview” holds a prominent place in the Report since it summarizes the whole report and is the only section that many will read. Although the later Chapters of NCA5 contain much sound scholarly content, Chapter 1 is marred by an activist tone and language that aggressively promotes emission reduction policies. As such, this chapter adds an imprimatur of scientific authority to oversimplified declarations of opinion about public policy. Many examples can be cited; here we note a few that are particularly egregious.

Chapter 1 opens as follows:

The more the planet warms, the greater the impacts. Without rapid and deep reductions in global greenhouse gas emissions from human activities, the risks of accelerating sea level rise, intensifying extreme weather, and other harmful climate impacts will continue to grow. Each additional increment of warming is expected to lead to more damage and greater economic losses compared to previous increments of warming, while the risk of catastrophic or unforeseen consequences also increases.

This statement presupposes that: all warming is anthropogenic in origin, all warming is bad and causes economic damage, warming causes extreme weather to intensify. Such sweeping generalizations go well beyond what science has or can establish. It also refers to growing risks without saying whether they were large to begin with: a small risk that grows may still be a small risk. A scientifically-sound version of this paragraph would instead say something like the following:

The Earth is warming because of a combination of natural and anthropogenic influences. This warming will generate a mix of benefits and harms that varies by region, to which society should be prepared to adapt. Some types of extreme weather have worsened recently, while others have not changed or have even declined in intensity. Reducing emissions of greenhouse gases might slow the warming although such policies have proven to be costly and disruptive, so any climate actions to be weighed against the potential benefits.

On the next page the Overview goes on to say:

Each additional increment of warming leads to greater risks [here it lists 7 key components of society including food security and the economy]... Without deeper cuts in global net emissions, climate risks to the US will continue to grow... Action to limit future warming and reduce risks can have near-term benefits and opportunities: low-carbon energy jobs, Improved air quality, Health benefits, Economic benefits...”

The authors write as if climate policy does not involve trade-offs and all measures to reduce future warming will be effective and beneficial. But the vast body of scholarship on climate science and economics does not support such simplistic claims. Not every additional increment of warming leads to economic harms, indeed (as is acknowledged in Chapter 19 on Economics) in some cases there will be benefits. Nor is climate policy guaranteed to create jobs or benefit the economy; in many cases it has done the opposite. Such deceit is a disservice to policymakers.

Pages 8 and 9 promote renewable energy options by noting, correctly, that the levelized costs of wind/solar generation have fallen sharply since 2010. This is proposed as rationale for pursuing deep emission reductions:

Recent growth in the capacities of wind, solar, and battery storage technologies is supported by rapidly falling costs of zero- and low-carbon energy technologies, which can support even deeper emissions reductions. For example, wind and solar energy costs dropped 70% and 90%, respectively, over the last decade, while 80% of new generation capacity in 2020 came from renewable sources.

Yet it has long been known that intermittent renewables generation must be supplemented by dispatchable generation to meet grid reliability standards, and that doing so (e.g., through natural gas, fission, or storage) can substantially increase the cost of electricity. Further, there are yet unmet synchronization challenges in transmission grids with heavy penetration of wind and solar power. Here again it is advisory malpractice not to acknowledge these facts.

Page 14 presents future emission scenarios with the following description: “Climate modeling experts develop global climate projections for a range of plausible futures.” The word “plausible” is applied to all the scenarios. The accompanying Figure includes both SSP3-7.0 and SSP5-8.5, the latter reaching the same radiative forcing as RCP8.5. The figure does not contrast observed emissions against previous projections nor does it caution readers that SSP3-7.0 and SSP5-8.5 are extreme worst case scenarios that, like RCP8.5, have been heavily criticized in the scientific literature (CWG25 3.2.1). By describing the entire envelope of emission projections as “plausible” the report opens the door to later presenting impacts associated with extreme and implausible emission scenarios as part of a baseline “business-as-usual” future.

Page 17 introduces the discussion of risks from extreme weather events by saying “Harmful impacts from more frequent and severe extremes are increasing across the country.” This creates the impression that disaster losses are driven by trends in extreme weather. While the section goes on to acknowledge that some of the increase is due to increases in the value of assets at risk it then invokes the NOAA Billion Dollar Dataset as evidence of extreme weather getting worse. Scientists have shown that this is an invalid metric (CWG 10.2) since it measures the growth of the economy not the frequency of extreme weather, and indeed NOAA has recently withdrawn the data product. Even though it was still distributed by NOAA at the time of the NCA5, the report authors should have assessed it skeptically and seen that it was unfit for the purpose of measuring climate trends and they should have taken care not to conflate extreme weather metrics with economic trends.

Page 23 states, in large font:

Climate changes are making it harder to maintain safe homes and healthy families; reliable public services; a sustainable economy; thriving ecosystems, cultures, and traditions; and strong communities.

It is pointless to try to evaluate this statement on scholarly grounds; it is self-evidently hyperbolic. This kind of language doesn’t belong in a scientific assessment report. Its prominent inclusion points not only to the willingness of NCA5 authors to promote hysteria, but also the ineffectiveness of the review process at not ensuring such statements are removed.

The tone of the Overview chapter hints at the priorities that governed the writing of the report as a whole. As a crude indicator of these priorities, word searches of the full document revealed the following occurrences:

Term	Number of occurrences
Forcing	111
Uncertainty	384
Watts	19
Culture/culturally	854
Equity/equitable	572
Indigenous	890
Sustainable	295
Racism/racial	153

3 OVERCONFIDENCE WHEN STATING CONCLUSIONS

3.1 Inflated certainty levels

A general pattern in the NCA5 is overconfidence in stating conclusions. The authors frequently make sweeping generalizations without appropriate caveats or acknowledging uncertainties. The overconfidence begins with inflated language to describe certainty levels.

The NCA5 uses specific terms to convey information about scientific confidence associated with important finds, observations and projections. The Front Matter of the NCA5 states that “confidence in a finding is based on the type, amount, quality, strength, and consistency of evidence; the skill, range, and consistency of methods to detect, evaluate, attribute, and interpret climate trends; and the degree of agreement across scientific information sources.”

Table 1 from the Front Matter provides calibrated language for confidence assessment:

Very high:	Strong evidence (established theory, multiple sources, well documented and accepted methods, etc.). High consensus
High:	Moderate evidence (several sources, some consistency, methods vary and/or documentation limited, etc.). Medium consensus
Medium:	Suggestive evidence (a few sources, limited consistency, methods emerging, etc.) Competing schools of thought.
Low:	Inconclusive evidence (limited sources, extrapolations, inconsistent findings, poor documentation and/or methods not tested, etc.). Disagreement or lack of opinions among experts.

This terminology is inflated: *high confidence* with just moderate evidence and medium consensus; *medium confidence* with only suggestive evidence and competing schools of thought. This inflation in terminology leads to overconfidence in the conclusions.

Even within the context of this inflated terminology, NCA5 further inflates the confidence level of many of its conclusions to well beyond what the IPCC has concluded with more thorough justification, and also by incorrectly applying its own standards. Several illustrative examples are provided.

Key Message 3.1 Traceable Account states:

“There is *very high confidence* that emissions of GHGs from human activities, fossil fuel use in particular, have unequivocally caused *all* global warming observed over the industrial era.”

Compare this statement with statements from the IPCC AR5 and AR6:

AR5: “It is *extremely likely* that *more than half* of the observed increase in global average surface temperature from 1951 to 2010 was caused by the anthropogenic increase in greenhouse gas concentrations and other anthropogenic forcings together.” (IPCC, 2013)

AR6: The *likely* range of total human-caused global surface temperature increase from 1850–1900 to 2010–2019 is 0.8°C to 1.3°C, with a best estimate of 1.07°C. It is *likely* that well-mixed GHGs contributed a warming of 1.0°C to 2.0°C, other human drivers (principally aerosols) contributed a cooling of 0.0°C to 0.8°C, natural drivers changed global surface temperature by –0.1°C to +0.1°C, and internal variability changed it by –0.2°C to +0.2°C. It is *very likely* that well-mixed GHGs were the main driver of tropospheric warming since 1979.

The IPCC AR5 and AR6 statements provide likelihood assessments but not a confidence level. While the NCA5 claims with *very high confidence* that fossil fuels have unequivocally caused *all* global warming, the AR5 refers to “*more than half* of the observed warming” and the AR6 provides a more nuanced statement that relates to a *likely* range of warming contributed to by human drivers.

NCA5 Key message 2.2: “Hurricanes have been intensifying more rapidly since the 1980s (*high confidence*) and causing heavier rainfall and higher storm surges (*high confidence*).” No justification is provided in Chapter 2 for the *high confidence* conclusion on higher storm surges or hurricanes causing heavier precipitation. The Traceable Accounts section, Description of Confidence and Likelihood states:

Basic physical understanding and climate models both provide robust explanations for the links between climate change and observed changes in these extremes: this is why the authors also have *high confidence* that storms are delivering more rainfall and high confidence that storm surges are becoming higher.

In short, NCA5 provides no observational basis or published research for their *high confidence* assertions that hurricanes are causing heavier rainfall and higher storm surges; and does not meet its own standards for a *high confidence level*.

3.2 Overstating findings in underlying sources

Although we did not do a detailed audit of the NCA5’s use of source material, spot checks turned up evidence of a pattern of overstatement.

Chapter 2 page 11 reports on an increase in precipitation in some areas and attributes it to climate change:

Many eastern regions of the country are getting wetter (Figure 2.4). Average annual precipitation from 2002-2021 was 5%-15% higher relative to the 1901-1960 average in the central and eastern US, a trend attributable to climate change.

Note that this is a non-standard metric; we will discuss NCA5's inconsistent choices of time scales of analysis below. The claims were attributed to the following paper:

- Knutson, Thomas and Fanrong Zeng (2018) "Model Assessment of Observed Precipitation Trends over Land Regions: Detectable Human Influences and Possible Low Bias in Model Trends" *Journal of Climate* 31(12)
<https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/31/12/jcli-d-17-0672.1.xml>

But Knutson and Zeng did not say these things. They examined linear trends over 1901 – 2010, 1951 – 2010 and 1981 – 2010. They did not compare average rainfall over 2002 - 2021 to average rainfall over 1901 – 1960, indeed their study was published in 2018 so it could not have. With regard to 1981-2010 trends they noted stronger trends in some areas but cautioned that such changes are consistent with natural variability, and they did not claim attributable trends were observed over the United States:

Observed annual precipitation trends over the recent 30-yr period 1981–2010 (Fig. 5) have generally stronger magnitudes (in mm yr⁻¹ decade⁻¹) than observed trends for 1901–2010 or 1951–2010. This is as expected since trends over a shorter period have stronger potential for occurrence of pronounced temporary trends due to internal variability alone. Only 9% of the analyzed area has detectable and attributable anthropogenic influence (categories –3, –2, +2, +3), which represents less than one-third of the fractional areal coverage of such trends for 1901–2010 (29%). ... Eight percent of the analyzed area has attributable anthropogenic *increases* (categories +2, +3), including parts of eastern Europe, northern Asia, northern Australia/Maritime Continent, and tropical Africa.

Consider a 2nd example. NCA5 Chapter 2 page 18 states

There is robust evidence that human-caused warming has contributed to increases in the frequency and severity of the heaviest precipitation events across nearly 70% of the US.

This is attributed to two papers:

- Diffenbaugh, N.S., D. Singh, and J.S. Mankin, 2018: Unprecedented climate events: Historical changes, aspirational targets, and national commitments. *Science Advances*, 4 (2), 3354.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aao3354>
- Kirchmeier-Young, M.C. and X. Zhang, 2020: Human influence has intensified extreme precipitation in North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117 (24), 13308-13313. <https://doi.org/10.1073/pnas.1921628117>

Diffenbaugh et al. presented ratios of observed occurrences of extreme events to simulated occurrence rates in CMIP6 models run with only natural forcings. They report that for 79% of the U.S. extreme rainfall event frequencies are currently higher than in model simulations, and the ratio of occurrences will rise under future warming simulations. This is not “robust” evidence of anthropogenic influence since it requires readers to assume that climate models provide accurate simulations of regional precipitation patterns, something which even the IPCC AR6 admits is uncertain (AR6 WGI SPM Box SPM 1.2, SPM Section C.1.3).

Kirchmeier-Young and Zhang looked at extreme 1- and 5-day events in North America and, using 3 GCMs, found “A signal of combined anthropogenic and natural external forcing can be detected in the intensification of extreme precipitation at the continental scale over North America. In some cases, this intensification can be attributed to human influence specifically.” However, they noted large differences among the three models in their simulated precipitation changes. Also, 2 of the 3 models failed to yield attribution for 5-day events for the North America mean, in other words the models disagreed on whether the observed changes were due to anthropogenic activity. Both cited references utilized the implausible RCP8.5 scenario and began their “historical” observational records only in 1961. Here again this is not “robust” evidence, it is suggestive but other studies have found natural variability predominant.

3.3 Technical example: Emergent constraints

Some of the overconfidence expressed by NCA5 arises by leaving out discussion of counterevidence in the peer-reviewed literature. An example is the topic of “emergent constraints”. Chapter 3 page 17 invokes this concept as grounds for its claim that key uncertainties have been reduced:

An approach to reduce uncertainty in climate change projections has matured over the past decade. It is known as “emergent constraints.” The term refers to strong statistical relationships between highly uncertain future climate parameters and observable trends or variations in the current climate, along with a physical explanation of this relationship.

Emergent constraints appeared in the climate modeling literature as an attempt to tie GCM behavior to climate observations in hopes of generating insight into real-world ECS. Climate models exhibit a wide range of sensitivities. The idea of emergent constraints is to examine whether the models with shared sensitivity values also share a common representation of some climate process (usually related to clouds) that might indirectly influence ECS. Suppose, for instance, that in low-ECS models the total cloud fraction in the tropics is strongly correlated with that in the southern midlatitudes but in high-ECS models the correlation is weak. Then researchers could check if the observed correlation is strong or weak and draw a conclusion about which type of model, and therefore which ECS value, is more likely.

A problem in the emergent constraint literature is that there has been a large proliferation of proposed correlations with little physical motivation. Many emergent constraints patterned on CMIP5 models failed to work on CMIP6 models (Schlund *et al.* 2020)³. In other words, the observed correlations in CMIP5 models between ECS and cloud processes failed to show up in CMIP6 models, indicating that they were likely spurious rather than clues to physical processes governing the Earth

³ Schlund, Manuel, Axel Lauer, Pierre Gentine, Steven C. Sherwood, and Veronika Eyring (2020) Emergent constraints on equilibrium climate sensitivity in CMIP5: do they hold for CMIP6? *Earth System Dynamics* 11 1233-1258 <https://doi.org/10.5194/esd-11-1233-2020>

climate system. The result was that emergent constraints estimated on CMIP5 models widened the range of estimated ECS values when applied to CMIP6 models.

Schlund *et al.* summarized the problem as follows:

In this study, we systematically analyze 11 published emergent constraints on ECS that have mostly been derived from models participating in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) project... The focus of the study is on testing if these emergent constraints hold for [Earth System Models] participating in the new Phase 6 (CMIP6). Since none of the emergent constraints considered here have been derived using the CMIP6 ensemble, CMIP6 can be used for cross-checking of the emergent constraints on a new model ensemble. **The application of the emergent constraints to CMIP6 data shows a decrease in skill and statistical significance of the emergent relationship for nearly all constraints, with this decrease being large in many cases.** Consequently, the size of the constrained ECS ranges (66% confidence intervals) widens by 51% on average in CMIP6 compared to CMIP5.

Yet NCA5 described the use of emergent constraint analysis as a great “advance” that reduced uncertainty.

4 RELIANCE ON *Ad Hoc* TIME SCALES FOR TREND ANALYSIS

In CWG25 Chapter 6 we discussed the need to be careful regarding the choice of time scale when making claims about trends in extreme weather. We gave examples from analysis of river flooding (6.1), heatwaves (6.3) and extreme precipitation (6.4) to show how assertions about apparent trends based on short data sets fall apart when looking at longer versions of the same data sets. Here we elaborate on these examples to illustrate a general point that NCA5 made inconsistent and *ad hoc* choices about time scales of analysis, weakening the validity of their conclusions.

McKittrick and Christy (2019)⁴ showed that apparently significant positive trends in U.S. average and extreme precipitation over the NCA4 interval (1901 – 2016) disappeared on longer samples (extending back as far as the 1840s depending on location) or on a shorter interval coinciding with the final 40 years of the data then available (1978 – 2017).

In CWG Section 6.4 we presented analysis of updated data for the same locations and many more besides, in all cases finding both considerable regional heterogeneity and that trends detectable on one time scale are often not detected on longer or shorter time scales, which argues against simple attribution of changes to anthropogenic influences.

4.1 Average and Extreme Precipitation

Under Key Message 2.2 “Extreme Events Are Becoming More Frequent and Severe” (p. 2-16) NCA5 states (p. 2-18):

Rainfall is becoming more extreme

Since the 1950s, there has been an upward trend in heavy precipitation across the contiguous US. This increase is driven largely by more frequent precipitation extremes, with relatively smaller changes in their intensity.

NCA5 did not continue the NCA4 precedent of using the post-1901 interval as the time scale for its precipitation discussion, instead it refers to changes “since the 1950s”. Fig. 2.8 suggests 1958 as the start date. For the present report we have extended the CWG25 analysis even further to include 141 stations across the US in the Pacific Coast, Midwest, Northeast and Southeast regions. We provide details in Appendix XX; here we note merely that once again it is possible to find trends that support the NCA5 position, but they are not robust to selecting longer or shorter time scales of analysis. Data from 1950 to 2024 yields many indications of increased average and extreme precipitation at individual stations and region-wide averages. But when using the entire data set (back to the 1890s or earlier depending on location) or the later subset (1980 to 2024) the trends become smaller, in many cases they become statistically insignificant, and occasionally they change sign. Only in the Northeast region are the post-1950 trends robust to also focusing on the post-1980 interval.

The following is a more accurate summary of what U.S. data show.

⁴ McKittrick, R., and J.R. Christy (2019). Assessing changes in US regional precipitation on multiple time scales. *Journal of Hydrology*, 578, 124074. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124074>

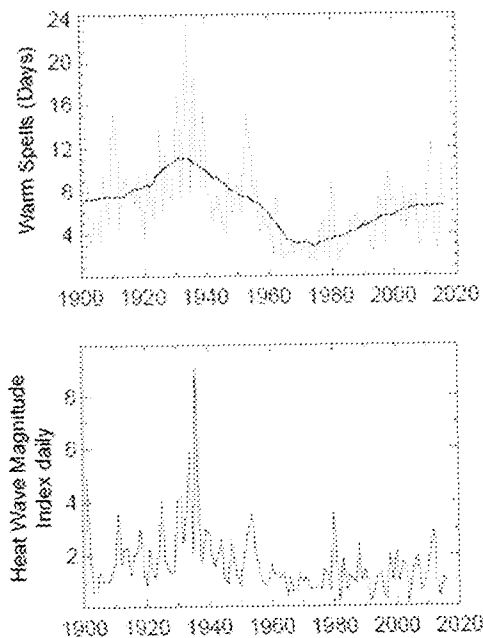
There are regionally-heterogenous changes in average and extreme precipitation. Positive trends in annual average rainfall and extreme events (defined either as the annual maximum or the number of exceedances of the 99th percentile value) are generally weak or non-existent when looking at samples exceeding 130 years in length. Significant trends can be found when beginning the sample in the 1950s although in most cases the trends weaken and become insignificant when looking at the post-1980 interval. This makes attribution to anthropogenic warming difficult.

4.2 Heatwaves

In contrast to NCA5, NCA4 examined heat extremes across the whole of the 20th century, pointing out that peak heat wave activity was reached in the 1930s and has decreased since then, and that recent increases are confined to areas west of the Rockies:

[The] warmest daily temperature of the year increased in some parts of the West over the past century, but there were decreases in almost all locations east of the Rocky Mountains. In fact, all eastern regions experienced a net decrease, most notably the Midwest (about 2.2°F [1.2°C]) and the Southeast (roughly 1.5°F [0.8°C]).

Since the mid-1960s, there has been only a very slight increase in the warmest daily temperature of the year (amidst large interannual variability). Heat waves (6-day periods with a maximum temperature above the 90th percentile for 1961–1990) increased in frequency until the mid-1930s, became considerably less common through the mid-1960s, and increased in frequency again thereafter. As with warm daily temperatures, heat wave magnitude reached a maximum in the 1930s. (NCA4 pp. 190-191)



U.S. Heat waves since 1900. Source: NCA4 Figure 6.4

Contrast this careful and factual language with NCA5 Key Message 2.2: “Extreme Events Are Becoming More Frequent and Severe.” This blanket statement is followed by NCA5 Figure 2.7 reproduced below.

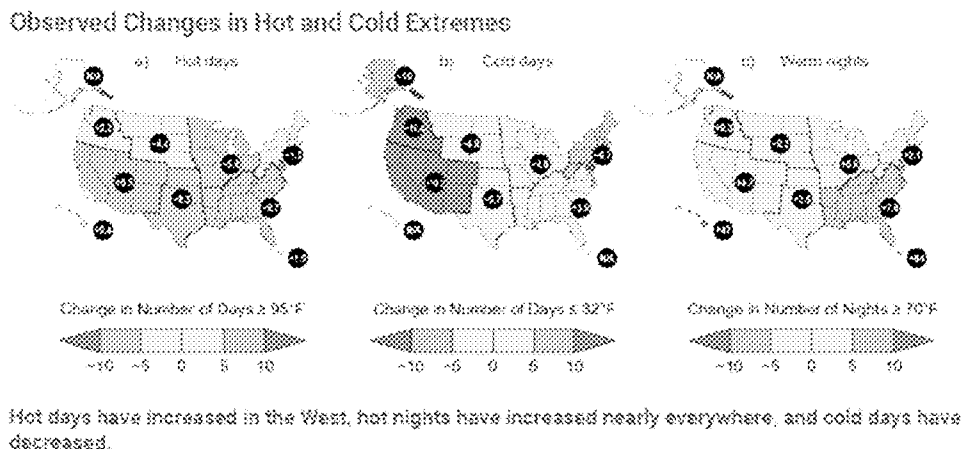


Figure 2.7. Over much of the country, the risk of warm nights has increased while the risk of cold days has decreased. The risk of hot days has also increased across the western US. This figure shows the observed change in the number of (a) hot days (days at or above 95°F), (b) cold days (days at or below 32°F), and (c) warm nights (nights at or above 70°F) over the period 2002–2021 relative to 1901–1960 (1951–1960 for Alaska and Hawaii and 1956–1980 for Puerto Rico). Data were not available for the US-Affiliated Pacific Islands and the US Virgin Islands. Figure credit: Project Drawdown, Washington State University Vancouver, NOAA NCED, and CIRES NC.

Close inspection shows that this Figure contradicts the NCA5 Key Message with respect to heatwaves and instead reinforces the position of the NCA4. The time scale of analysis for this Figure is stated as the number of hot days, cold days and warm nights (respectively in panels a—c) over the period 2002-2021 compared to 1901-1960. Presumably (though not stated in the caption) the counts are per year. Notwithstanding Key Message 2.2 the leftmost panel shows that over most of CONUS the number of extreme heat days has decreased in recent decades compared to the prior century.

The accompanying discussion in NCA5 becomes convoluted since it appears to be aimed at supporting the Key Message despite the contrary evidence. NCA5 chapter 2 elaborates on KM2.2 by saying (p. 16):

Observations show an increase in the severity, extent, and/or frequency of multiple types of extreme events. Heatwaves have become more common and severe in the West since the 1980s (*high confidence*).

But it does not mention the decline elsewhere. On the next page (p. 17) it says:

By some measures, the most extreme heatwaves on record in the United States occurred during the Dust Bowl era of the 1930s. ... Globally such heatwaves are becoming more frequent, and in recent decades the western United States has been following those trends.

Reference to a global trend seems to be an attempt to tie heatwaves to climate change, but then the obvious question, unaddressed by NCA5, is why only part of the U.S. follows it while most of the

country is trending in the opposite direction. These issues were addressed in CWG25 Ch6, demonstrating that the range and magnitude of extreme temperatures (10s of degrees) are driven more by natural variability than the small extra forcing from the enhanced concentrations of CO₂. The data shown in CWG25 shows that in terms of both (a) hot days ($\geq 95^{\circ}\text{F}$) and (b) number of days in heatwaves, the current decade is experiencing no more than was experienced 100 years ago. For example, in the 30-year period 1925-1954, representing only 23% of the 1899-2024 data record, the CONUS experienced 33% of the total heat wave days. The most recent 30-years experienced 24%, almost exactly that expected by chance. Thus, the NCA5 claim that “multiday heatwaves have become hotter, more frequent, larger, and longer lasting in recent decades,” is seen to be simply false when expanding the temporal and spatial domains to encompass all available data (Ch6 Fig. 6.3.6 CWG25).

The NCA5 then pointed to the dramatic Pacific Northwest heatwave of 2021. CWG Section 8.6.1 discussed this event in detail, reviewing the findings of multiple peer-reviewed studies that explained the unusual meteorological conditions giving rise to it were unrelated to climate change, a point omitted from the NCA5 discussion.

NCA5 finally turns to the declining heatwave trend in CONUS east of the Rockies but attempts to reframe it by focusing on urban warm spells.

[The] number of very hot days has actually decreased across the central and eastern regions due to summer cooling trends in the region (Figure 2.7; Ch. 22). This does not, however, mean the central and eastern US are not affected by heat. The impacts of extreme high temperatures are more severe if such conditions persist for several days, and overall, multiday heatwaves have become hotter, more frequent, larger, and longer lasting in recent decades. Across 50 large US cities, the US Global Change Research Program heatwave indicator (<https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves>) shows that the average number of heatwaves has doubled since the 1980s, and the length of the heatwave season has increased from about 40 days to about 70 days.

We discussed this issue in CWG25 Section 6.3. The Figure referenced by NCA5 uses an *ad hoc* definition of heat wave, namely two consecutive days with minimum nighttime temperatures above the 85th percentile, and an *ad hoc* time scale which begins in the 1960s, the coldest decade in the last century, thus suppressing any comparison to the 1930s. Nighttime temperatures in urban areas have gone up faster than daytime temperatures (which the NCA5 acknowledges), but this is a signature of urban heat island effects and is not a good metric of climate change. CWG25 noted as well that the occurrence of hot days ($\geq 95^{\circ}\text{F}$) has recently increased in the West, but declined in the remainder of the country, and in the nationwide average, since 1899.

5 INADEQUATE TRACEABLE ACCOUNTS

Starting with the NCA3, the NCA has included a section on Traceable Accounts at the end of each Chapter. This is the description from the NCA5:

Each chapter concludes with a section entitled Traceable Accounts, which provides information on the overall process used to develop the chapter as well as a separate Traceable Account section for each Key Message. These Traceable Accounts describe the supporting evidence behind each Key Message, the process and rationale authors used in reaching their conclusions, and the author team's expert assessment of the confidence in and, where applicable, likelihood of these conclusions. As such, Traceable Accounts provide information about the state of the science, document sources of uncertainty, identify research gaps, and allow traceability to data and resources.

The Traceable Accounts for each Chapter and Key Message includes the following sections:

- Description of Evidence Base
- Major Uncertainties and Research Gaps
- Description of Confidence and Likelihood

The Traceable Accounts are in principle an important factor in addressing the NCA's statutory requirement to discuss scientific uncertainties. Further, the Traceable Accounts can help satisfy the Executive Order for Restoring Gold Standard Science with regards to: reproducibility, transparency, communication of error and uncertainty, and skepticism of findings and assumptions. However, the execution of the Traceable Accounts is uneven, often superficial and noninformative in Chapters 2 and 3 (which were the only Chapters investigated here). Here is an example from Key Message 2.2: Extreme Events are Becoming More Frequent and Severe.

The Description of the Evidence Base consists of two paragraphs, with the first paragraph summarizing the findings and the second paragraph providing a generic description of the types of data that can be used for storms. Major Uncertainties and Research Gaps focuses on the uneven distribution across US populations due to differences in exposure and vulnerability. The only limitations in data referred to are the lack of a long-term record of lightning, and the lack of homogenized daily and hourly temperature data except from reanalysis products.

The most astonishing deficiency is in the Description of Confidence and Likelihood. One of the statements in Key Message 2.2 is:

Hurricanes have been intensifying more rapidly since the 1980s (high confidence) and causing heavier rainfall and higher storm surges (high confidence).

The Description of Confidence and Likelihood includes the following statement:

Basic physical understanding and climate models both provide robust explanations for the links between climate change and observed changes in these extremes: this is why the authors also have high confidence that storms are delivering more rainfall and high confidence that storm surges are becoming higher.

No reference to journal publications or a specific data set is made in the Chapter regarding hurricane induced precipitation or storm surge to support this *high confidence* conclusion.

With regards to Chapter 3, there are some substantial inconsistencies between the Traceable Accounts for the different Key Findings:

Key Message 3-1: Human activities have caused global warming.

Confidence and Likelihood: “There is *very high confidence* that emissions of GHGs from human activities, fossil fuel use in particular, have *unequivocally* caused all global warming observed over the industrial era. There is also *very high confidence* that changes in natural climate drivers have had globally small and regionally variable long-term effects over this period.”

The Uncertainties section only addresses uncertainties in radiative forcing of greenhouse gases. By contrast, consider Key Message 3-4: “Humans are changing Earth System processes.” The Traceability Analysis in this section contains arguably the most scientifically credible text in the entire Chapter. From Description of Evidence Base:

In the last decade, there has been increasing recognition of the role of regional-scale natural variability in the past and future evolution of climate, as well as the fact that regional natural variability signals can be competitive with forced anthropogenic signals.

From Major Uncertainties and Research Gaps:

For example, the true natural variability of the climate system on decadal to centennial timescales could be larger than what we estimate from GCMs, which would further increase the irreducible uncertainty stemming from natural variability.

As part of the Traceable Account: “Each figure and some tables are accompanied by a metadata survey, which can be accessed in the online version of the report by clicking on the eyeball icon above the figure or table (see the table below for explanations of additional icons used throughout the report). The metadata survey describes data sources, figure or table development methods, copyright information, and other important documentation.” Upon clicking on the eyeball icon above a particular figure, a Contact US email appears, addressed to the USGCRP. No attempt was made to send a email to elicit the Metadata information, but it is clear that this information is not readily accessible online.

In summary, the Traceable Analyses examined here, with few exceptions, fail to meet the stated objectives set forward by the NCA.

6 OVEREMPHASIS ON EXTREME SCENARIOS

To respond to the GCRA mandate to “project major trends for the subsequent 25 to 100 years,” the NCA relies on projections of future climate change based on estimates of future emissions (the so-called SSP scenarios) and/or specified levels of radiative forcing (the RCP scenarios). For the most part, NCA5 uses scenarios developed for the IPCC Assessment Reports.

In CWG Section 3.2.1 we presented a critical assessment of past and current IPCC scenario envelopes, showing that they have tended to overshoot observed emissions. The IPCC AR6 published in 2021 stated that “The likelihood of high-emission scenarios like RCP8.5 and SSP5-8.5 is considered low in light of recent energy sector developments.” In 2021, UN Climate Negotiators (COP) stopped using scenarios above 4.5. NCA5 makes the following observations about the scenarios they use:

“NCA5 authors were advised to assess the full range of scenarios available.” (Front Matter)

“Scenarios of future emissions and land-use change are developed as plausible alternatives, but no relative likelihood is attached to them. Some recent studies, however, have argued that the highest scenario, SSP5-8.5, is no longer plausible without a reversal of current trends in the adoption of renewables and energy efficiency.” (Key Message 3.3 Traceable Analysis)

Despite acknowledging the issue the NCA5 otherwise ignored the problem. A keyword search of the NCA5 of mentions of RCP/SSP scenarios finds over 50% referred to the extreme emissions scenarios RCP8.5/SSP5-8.5. Further, 10 figures *only* included the 8.5 scenarios: 5.2, 6.9, 7.4, 11.3, 14.6, 22.13, 22.19, 27.9, 29.13.

The problem of relying on extreme scenarios is particularly acute for NCA5’s sea level rise projections. The sea level rise scenarios used in the NCA5 do not relate directly to the SSP emissions scenarios, but to specified amounts of sea level rise by 2100, whereby Low relates to 0.3 m (0.98 feet), Intermediate-Low relates to 0.5 m (1.64 feet), Intermediate relates to 1.0 m (3.28 feet), Intermediate-High relates to 1.5 m (4.92 feet), and High relates to 2.0 m (6.56 feet). (Table 4 of Guide to Using this Report).

Table 4. Descriptive Terms for Common Sea Level Rise Scenarios Used in NCA5

Future global mean sea level rise and sea level rise along United States coastline are shown for five scenarios in feet (and meters), relative to a 2000 baseline. The US values shown in the right half of the table are averaged across the US coastal regions, including the contiguous US, Alaska, Hawaii and the US-Affiliated Pacific Islands, and the US Caribbean. The national values shown in the table differ substantially from regional values. For example, sea level rise is higher in the Gulf Coast and lower or even negative in some parts of Alaska. In the next 100 years (2020–2100), sea level along the contiguous US coasts is expected to rise 0.92 feet (0.28 m), the same amount of sea level rise observed over the last 100 years (1920–2020). See Chapter 9 for regional sea level information. Adapted from Sweet et al. 2022.¹

Sea Level Rise Scenario Descriptor	Global Mean Sea Level			United States		
	2050	2100	2150	2050	2100	2150
Low	0.49 (0.15)	0.98 (0.3)	1.31 (0.4)	0.59 (0.18)	0.98 (0.3)	1.64 (0.5)
Intermediate-Low	0.66 (0.20)	1.64 (0.5)	2.62 (0.8)	0.75 (0.23)	1.64 (0.5)	2.95 (0.9)
Intermediate	0.92 (0.28)	3.28 (1.0)	6.23 (1.9)	0.89 (0.27)	3.28 (1.0)	6.89 (2.1)
Intermediate-High	1.21 (0.37)	4.92 (1.5)	8.86 (2.7)	1.12 (0.34)	4.92 (1.5)	8.86 (2.7)
High	1.41 (0.43)	6.56 (2.0)	12.14 (3.7)	1.38 (0.42)	6.56 (2.0)	12.46 (3.8)

CAPTION NEEDED

The text following is Judy's latest edit

Considering only projections representing processes quantified with at least medium confidence, the IPCC AR6 assessed global mean sea level projections for 2100 to fall between 0.2 and 1.6 m (5th—95th percentile range). Nevertheless, the range of sea level rise scenarios considered by the NCA5 extends to 2.0 m. Further, the NCA5 neglects to include plausible lower scenarios, such as 0.2 m cited by the IPCC, which also corresponds to the average rate of sea level rise over the past century.

With regards to actual predictions of sea level rise, Chapter 9 of the NCA states: “Under a range of potential global warming levels, average sea level along US coastlines is *likely* to be between 12 and 20 inches above 2000 sea levels in 2050.” These values of sea level rise encompass the Intermediate scenario to values slightly higher than the High scenario from NCA5 Table 4 shown above.

Global sea level rise projections to 2050 relative to a 2000 baseline can be evaluated with respect to the observed global sea level rise from 2000-2024, which is approximately 3.39 inches (0.28 feet). <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level> Hence NCA5 is projecting values of sea level rise between 2025 and 2050 that are 3.5 to 5.8 times the rate observed during 2000-2024.

Chapter 9 further states: “Looking toward the future, an 11 inch (28 cm) average rise along the contiguous US coastline is expected by 2050 (relative to 2020), with a *likely* range of 9-13 inches.” With regards to confidence levels, NCA5 Chapter 9 Traceable Accounts states: “There is *high confidence* and it is *likely* that sea levels will rise about 11 inches (likely range of about 9–13 inches) between 2020 and 2050”

In summary, the NCA5 presents future sea level rise scenarios that are not directly relatable either to SSP/RCP emissions scenarios or Global Warming Levels. The NCA5 scenarios include some that are higher than the 95th percentile for the extreme emissions scenario RCP8.5 that include hypothesized ice sheet processes for which there is low confidence. Projections to 2050 require rates of sea level rise from 2025 to 2050 that are more than three times the rate observed during 2020-2024. Further, the NCA5 ascribes *high confidence* to these sea level rise projections.

In summary, the NCA5 inclusion, and even the focus, on implausible extreme emissions scenarios supports projections of alarming impacts that are very unlikely to be driven by anthropogenic warming.

7 INADEQUATE NASEM REVIEW: TO BE ADDED

The National Academies of Science, Engineering and Medicine (NASEM) undertook a detailed review of the draft NCA5 (NASEM 2023).⁵ While they raised some of the concerns we have articulated herein their review is superficial overall and appears to be written by authors who share many of the activist

⁵ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2023. *Review of the Draft Fifth National Climate Assessment*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26757>.

biases of the NCA5 team. There is an inordinate focus on on social and policy issues (e.g., every chapter is assessed under the heading “Comments on Equity and Justice”), rather than on the underlying science. In our assessment NASEM failed to apply the serious rigor one would expect. A few extracted comments from it will illustrate. Note that NASEM review comments are included here in blue font for reference.

7.1 Substantive criticisms by NASEM

- summarize the valid points made by NASEM and check the NCA replies

7.2 Failures to challenge NCA5 flaws

NASEM praised Chapter 2, saying:

The chapter [2] meets the requirements of Section 106 of the GCRA.

Yet contrary to the requirements of Section 106 the NCA5 did not discuss natural variability let alone assess the full climate record available for quantifying natural variability. Chapter 2 actually minimizes natural variability by claiming (unsubstantiated) skill in attributing recent extremes to human causes. For example NCA5’s Chapter 2 Introduction states,

“...recent advances in attribution science (KM 3.3) mean that the role of climate change in some extreme events can now be quantified in real time. For example, climate change made the record-breaking Pacific Northwest heatwave of June 2021 2° to 4°F hotter, and in 2017 ...”

CWG25 reviews the expert literature demonstrating that this particular event would have happened with or without climate change and that for the CONUS, hot extremes are no more frequent now than they were in the past. NASEM did not challenge the unsubstantiated attribution claims in the NCA5.

Notwithstanding NASEM’s claim that the Chapter complies with Section 106 of the GCRA it then acknowledged the absence of discussion of natural variability:

...the discussion and references regarding the role of natural climate variability and its regional differences are missing.

While a nod to natural variability is occasionally found in NCA5, it is usually followed by a “however” to emphasize human influence. One example is the statement just before the claim mentioned above pertaining to extreme event attribution: “There has always been extreme weather, which occurs even in an unchanged climate due to the natural variability of the Earth system. However, recent advances in attribution science (KM 3.3) mean that the role of climate change in some extreme events can now be quantified in real time...”

We pointed out that the evidence regarding heatwaves directly contradicts Key Message 2.2. NASEM did not mention this, instead it focused on a somewhat esoteric issue of terminology:

“Extreme Events Are Becoming More Frequent and Severe.”

Key Message 2.2 is another generally well written key message. However, while the title of this key message includes the word “risk,” the key message is exclusively about hazard. The Committee suggests rewriting the key message title to more accurately reflect the discussion on hazards.

The NASEM review appears to accept the NCA5’s use of short data records because it makes no critical remarks about the failure to assess long time series, except for its observation that the use of short records makes the omission of natural variability that much more of a problem:

It is also important to point out that the influence of natural climate variability becomes particularly strong when the climate trend is computed based on short periods of time or small geographic areas.

This comment was largely ignored in the NCA5 final text.

8 SUMMARY: EVALUATION OF THE NCA5

8.1 Pertinent aspects when evaluating NCA5 in light of statutory requirements

- not our remit to make a ruling but here are aspects to consider in light of statutory requirements

8.2 Evaluation from the perspective of expert users of the report

- we have deep knowledge of the topics surveyed by the NCA5 authors
- we do not have confidence that the report was balanced and comprehensive
- we can point to many specific instances in which the report did not exhibit an appropriate level of quality or integrity as a scientific document
- we have reason to believe the whole process, from author selection to handling of expert reviews, was biased towards reinforcing foregone conclusions and alarmist messaging

8.3 Evaluation from the perspective of citizens interested in good policymaking

- Public concerns about climate change are valid, as are concerns about cost of living, economic growth, employment, etc.
- We share the general concern that elected officials and those who serve them have the best information available when making important decisions around energy and climate policy
- NCA5 was a missed opportunity: it could have been a valuable input to that process but it did not turn out that way
- consequently its usage is unlikely to lead to better decisions and would more likely increase the error rate in policy formation and we recommend it not be used for policymaking purposes.

APPENDIXES

APPENDIX 1: Seth's letter on statutory requirements for NCA5

APPENDIX 2: Analysis of 141 U.S. Longterm Daily Precipitation Records.

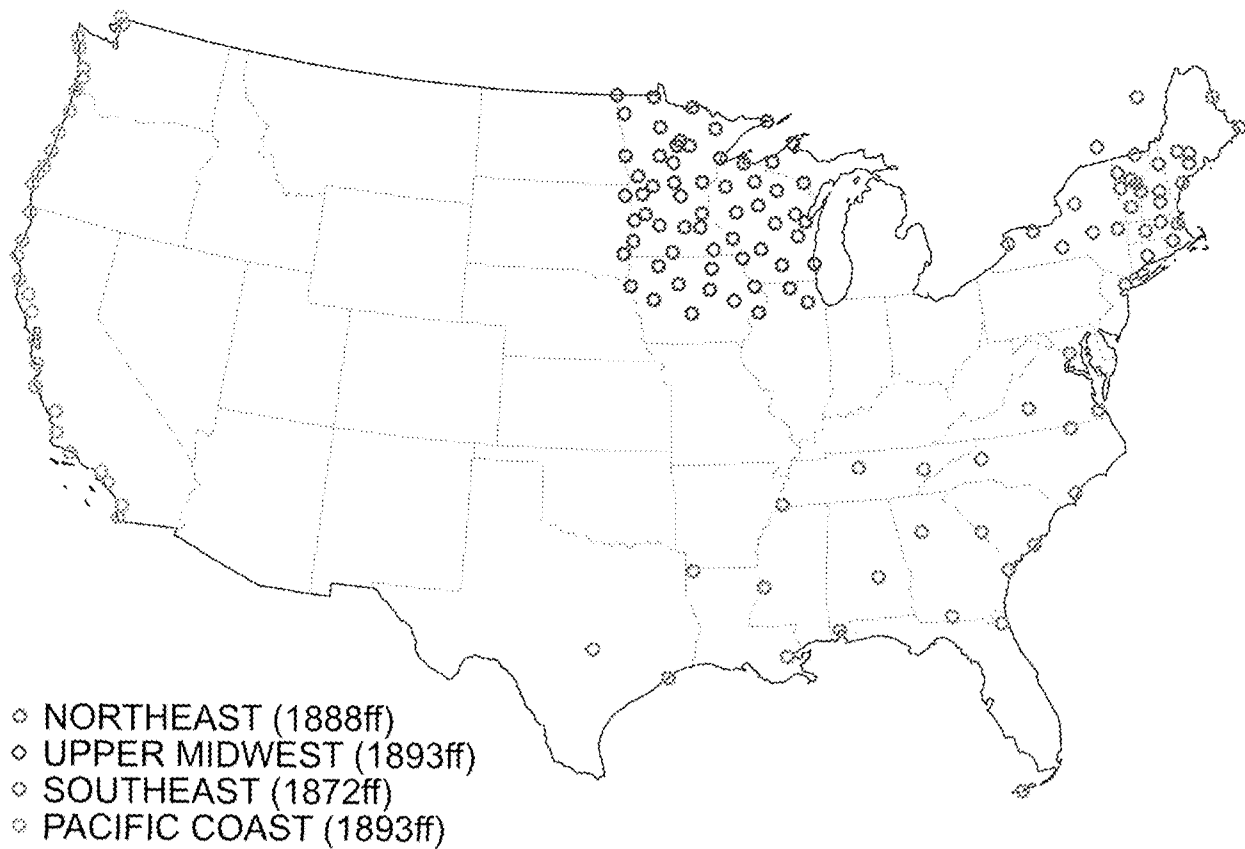


Figure. Stations used in the following analyses.

Table codes: (-) neg insignificant, -- neg significant, (+) pos insignificant, ++ pos significant.

Column 1: Measure

Column 2: Number of stations in that region

Column 3: Count of stations exhibiting a significant positive trend

Column 3: Count of stations exhibiting a significant negative trend

Column 5: Characteristic of region-wide trend

PACIFIC COAST

Since 1893:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	29	0	1	(-)
2-day average	29	0	1	(-)
Avg on non-zero days	29	0	9	--
Variability	29	1	0	(+)
Annual max	29	2	1	(+)

Number of 99 th pct exceedances	29	1	0	(-)
--	----	---	---	-----

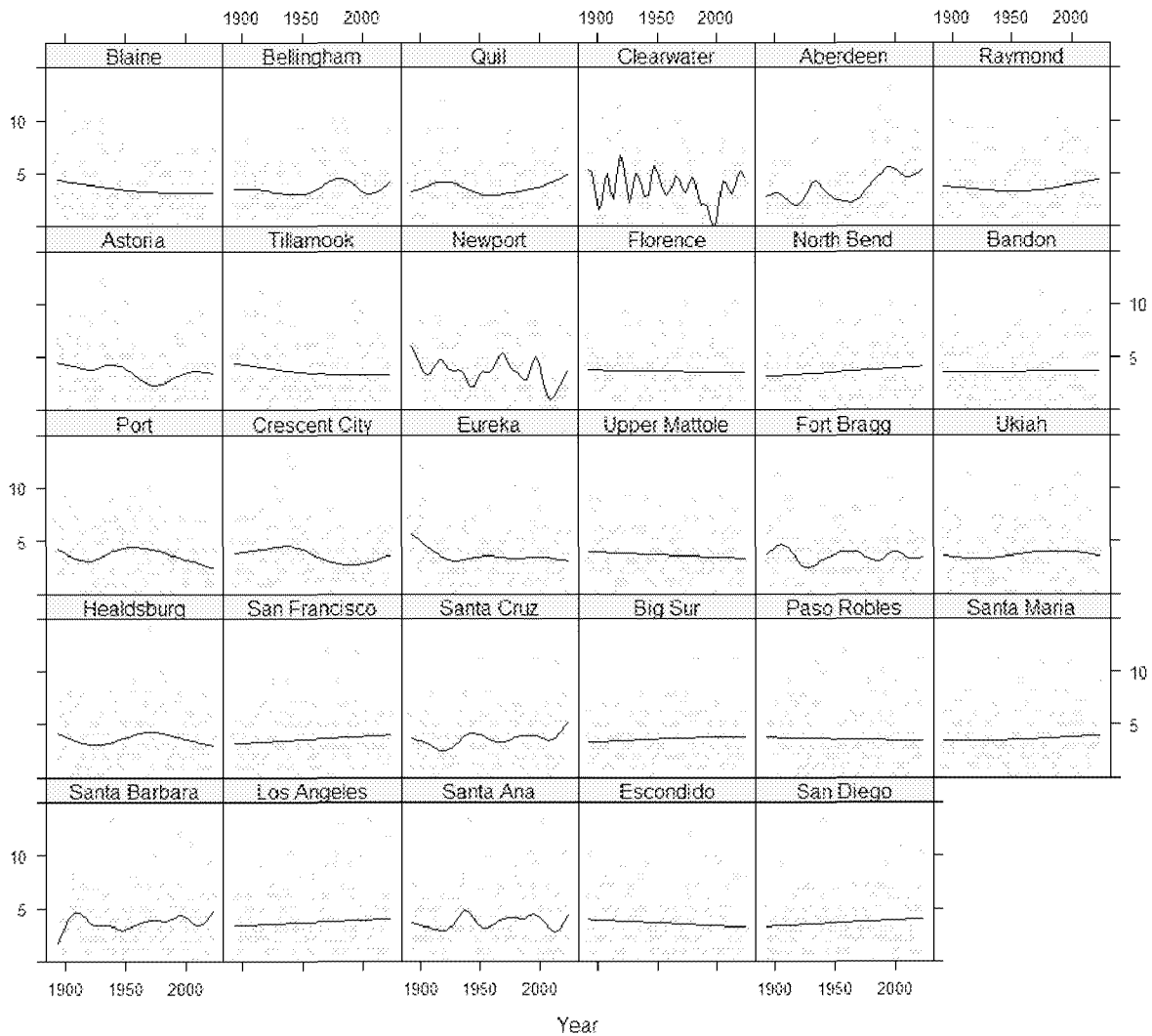
Since 1950:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	29	0	1	(-)
2-day average	29	0	1	(-)
Avg on non-zero days	29	0	4	(-)
Variability	29	2	3	(-)
Annual max	29	6	3	(-)
Number of 99 th pct exceedances	29	2	1	(-)

Since 1980:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	29	0	0	(-)
2-day average	29	0	0	(-)
Avg on non-zero days	29	0	1	(-)
Variability	29	0	0	(-)
Annual max	29	2	1	(-)
Number of 99 th pct exceedances	29	0	0	(+)

Annual No. 99th Percentile Exceedances PC 1893-2024



SOUTHEAST

Since 1873:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	24	1	1	(+)
2-day average	24	1	1	(+)
Avg on non-zero days	24	7	2	(+)
Variability	24	1	0	(+)
Annual max	24	2	0	(+)
Number of 99 th pct exceedances	24	5	0	(+)

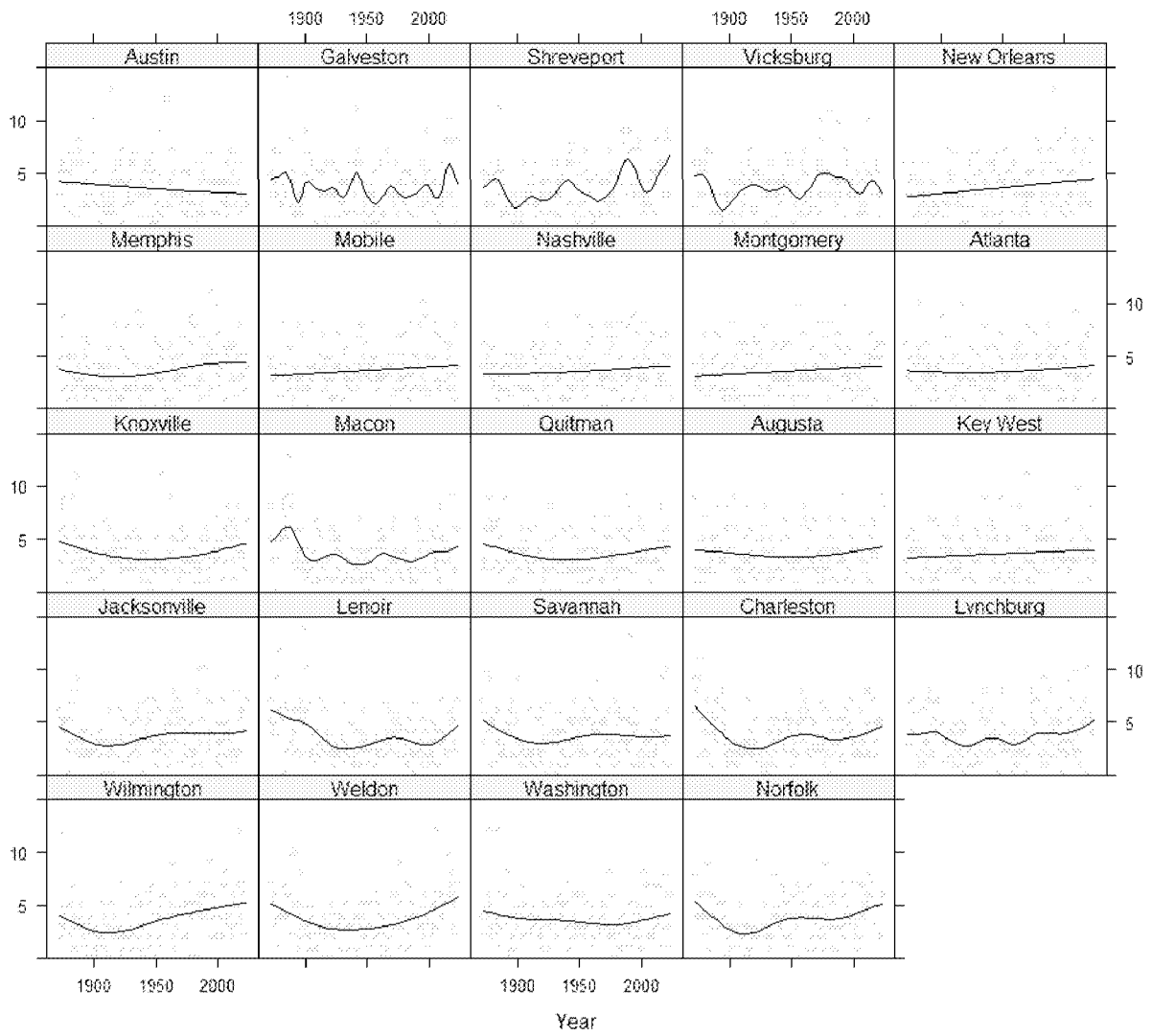
Since 1950:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	24	5	0	++
2-day average	24	5	0	++
Avg on non-zero days	24	5	1	++
Variability	24	6	0	++
Annual max	24	4	0	++
Number of 99 th pct exceedances	24	4	0	(+)

Since 1980:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	24	5	0	(+)
2-day average	24	5	0	(+)
Avg on non-zero days	24	5	1	(+)
Variability	24	3	0	(+)
Annual max	24	4	0	(+)
Number of 99 th pct exceedances	24	4	0	(+)

Annual No. 99th Percentile Exceedances SE 1873-2024



MIDWEST

Since 1893:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	61	23	0	++
2-day average	61	23	0	++
Avg on non-zero days	61	2	12	(+)
Variability	61	12	0	++
Annual max	61	9	0	(+)
Number of 99 th pct exceedances	61	10	0	(+)

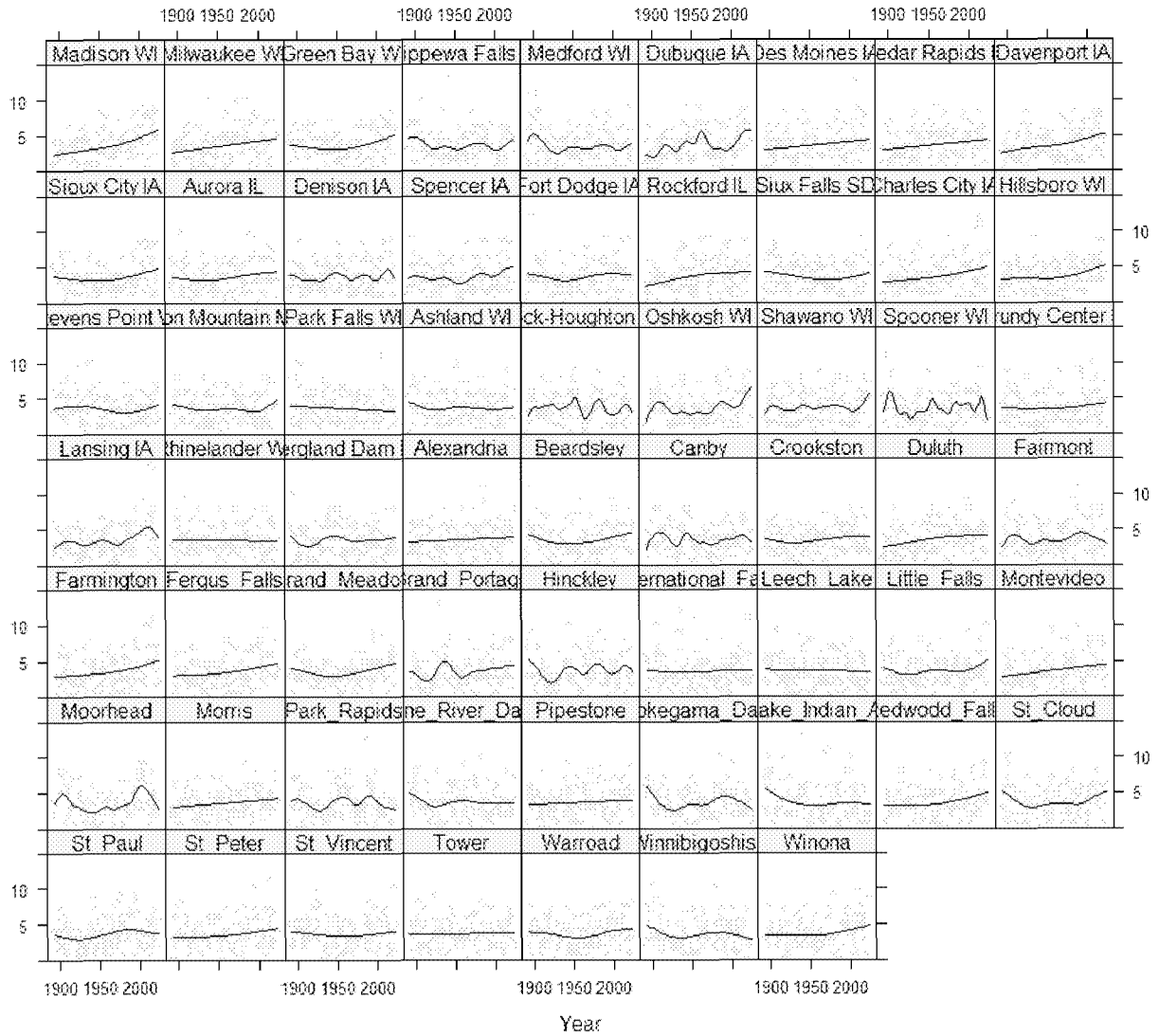
Since 1950:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	61	28	2	++
2-day average	61	28	2	++
Avg on non-zero days	61	11	1	++
Variability	61	16	0	(+)
Annual max	61	8	0	(+)
Number of 99 th pct exceedances	61	19	0	++

Since 1980:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	61	6	1	(+)
2-day average	61	6	1	(+)
Avg on non-zero days	61	8	2	(+)
Variability	61	5	1	(+)
Annual max	61	0	1	(+)
Number of 99 th pct exceedances	61	5	3	(-)

Annual No. 99th Percentile Exceedances MW 1893-2024



NORTHEAST

Since 1888:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	27	12	0	++
2-day average	27	12	0	++
Avg on non-zero days	27	7	1	(+)
Variability	27	4	0	(+)
Annual max	27	3	0	(-)
Number of 99 th pct exceedances	27	5	0	(+)

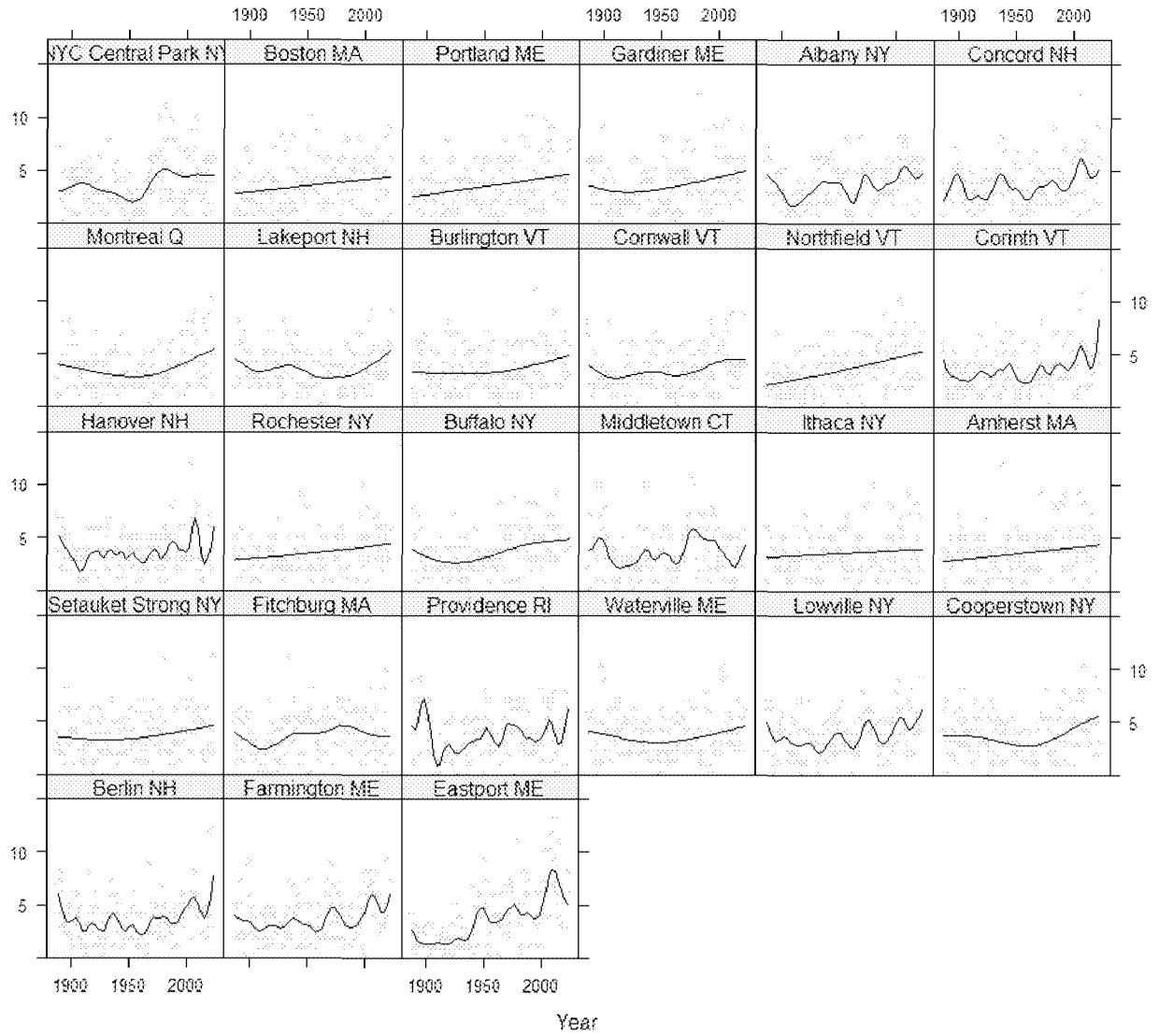
Since 1950:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	27	12	0	++
2-day average	27	12	0	++
Avg on non-zero days	27	7	1	(+)
Variability	27	4	0	(+)
Annual max	27	3	0	(-)
Number of 99 th pct exceedances	27	5	0	++

Since 1980:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	27	10	1	++
2-day average	27	10	1	++
Avg on non-zero days	27	6	0	(+)
Variability	27	2	0	(+)
Annual max	27	1	0	(+)
Number of 99 th pct exceedances	27	1	1	++

Annual No. 99th Percentile Exceedances NE 1888-2024



From: Ross McKittrick <ross.mckittrick@gmail.com>
Sent: Friday, June 20, 2025 12:29 PM
To: Judith Curry; Travis Fisher; John Christy; Roy W. Spencer; Steven Koonin; Josh Loucks; Cohen, Seth
Subject: June 20 docs
Attachments: 01.NCA5.Review.June20.docx; 6-10-25 - USGCRP Framing Doc - DRAFT[June20].docx

Today's draft with post-meeting tidying.
Also, draft charge letter.
-Ross

Review of the Fifth National Climate Assessment

EXECUTIVE SUMMARY	3
1 INTRODUCTION	4
1.1 ABOUT THIS REPORT	4
1.2 ABOUT THE NATIONAL CLIMATE ASSESSMENTS	4
1.3 STANDARDS FOR ASSESSING NCA PRODUCTS	5
1.4 WHEN PEER REVIEW FAILS	6
2 NCA5 OVERVIEW CHAPTER: HYPERBOLIC ADVOCACY LANGUAGE AND UNSCIENTIFIC TONE.....	9
3 OVERCONFIDENCE WHEN STATING CONCLUSIONS	11
3.1 INFLATED CERTAINTY LEVELS	11
3.2 OVERSTATING FINDINGS IN UNDERLYING SOURCES	12
3.3 TECHNICAL EXAMPLE: EMERGENT CONSTRAINTS	14
4 RELIANCE ON SHORT TIME PERIODS FOR TREND ANALYSIS.....	15
4.1 AVERAGE AND EXTREME PRECIPITATION.....	15
4.2 HEATWAVES.....	16
5 INADEQUATE TRACEABLE ACCOUNTS.....	18
6 OVEREMPHASIS ON EXTREME SCENARIOS	20
7 INADEQUATE NASEM REVIEW: TO BE ADDED.....	22
7.1 SUBSTANTIVE CRITICISMS BY NASEM.....	23
7.2 FAILURES TO CHALLENGE NCA5 FLAWS.....	23
8 SUMMARY EVALUATION OF NCA5	24
9 REFERENCES	26
APPENDICES.....	27
APPENDIX 1: CHARGE TO THE REVIEW	27
APPENDIX 2: REPRODUCIBILITY OF NCA5 CLAIM OF EXTREME PRECIPITATION TRENDS	28
ABOUT THE AUTHORS.....	33

EXECUTIVE SUMMARY

This report critically evaluates the Fifth National Climate Assessment (NCA5), finding it an inadequate basis for climate and energy policies. A detailed review of the foundational chapters on climate science raises several key concerns:

Scientific Integrity

- An advocacy tone, particularly in the Overview chapter, inconsistent with scientific objectivity
- An endemic overconfidence when stating conclusions, including inflated certainty levels and overstatement of findings from underlying sources

Flawed methodology

- Use of *ad hoc* time scales for trend analyses in areas such as precipitation and heatwaves
- An overemphasis on extreme scenarios for future emissions
- Inadequate traceable accounts to support key conclusions

Deficient Review Process

- A review by the National Academy of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM) failed to challenge some fundamental flaws in NCA5
- The NCA5 authors failed to adopt some improvements recommended by NASEM

The report shows NCA5 to be a biased and incomplete picture of climate science that skews toward excessive climate risk. Consequently, NCA5 should not be used as basis for climate and energy policies.

1 INTRODUCTION

1.1 About this Report

This report responds to a request from OSTP Director Michael Kratsios (reproduced in Appendix 1) that we assess the suitability of the Fifth National Climate Assessment (NCA5 2023) for informing climate and energy policies.

To conduct this assessment we reviewed NCA5 itself, the National Academies of Science, Engineering and Medicine (NASEM) review of the Third Order Draft, and the USGCRP responses to that review. We have drawn upon our long experience working on advisory reports, including for the NASEM, the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and other organizations, as writers, reviewers and study leaders.

We find that NCA5 should not be relied on for policy making as it is an incomplete and misleading picture of our understanding of the changing climate and the risks it poses to the nation. NCA5 was selective and incomplete in its survey of climate science as of its publication in 2023 and has become even more so in the years since. We have reviewed many key scientific developments in a separate report to Energy Secretary Wright (Climate Working Group 2025, herein denoted “CWG25”). The overall effect of the biases and omissions of NCA5 is an excessively dire picture of climate risk.

To support our finding, the following sections of this chapter provide some background on the National Climate Assessments and the standards by which we have assessed NCA5. Chapters 2 through 6 detail important ways in which NCA5 fails to meet those standards. Chapter 7 then follows with an assessment of the NASEM review. Finally, Chapter 8 summarizes our evaluation of NCA5.

1.2 About the National Climate Assessments

The U.S. Global Change Research Program (USGCRP) was established by Presidential Initiative in 1989 and mandated by Congress in the Global Change Research Act (GCRA) of 1990 to develop and coordinate “a comprehensive and integrated United States research program which will assist the Nation and the world to understand, assess, predict, and respond to human-induced and natural processes of global change.”

The National Climate Assessment (NCA) Reports evolved from the GCRA requirement to

Prepare and submit to the President and the Congress an assessment which (1) integrates, evaluates, and interprets the findings of the Program and discusses the scientific uncertainties associated with such findings; (2) analyzes the effects of global change on the natural environment, agriculture, energy production and use, land and water resources, transportation, human health and welfare, human social systems, and biological diversity; and (3) analyzes current trends in global change, both human-induced and natural, and projects major trends for the subsequent 25 to 100 years.

The five NCA Reports to date have interpreted this mandate in different ways:

- NCA1 (2000) was a multidisciplinary effort to study and portray in regional detail the potential effects of human-induced global warming on the United States.
- NCA2 (2009) was a relatively short report that not only focused on the potential consequences of climate change but also sought to identify potential adaptation measures and identify the highest priorities for future research.

- NCA3 (2014) was an expanded effort that continued along the lines of NCA2, and was distinguished by a comprehensive review process, including a review by the National Academy of Sciences. NCA3 introduced a traceability analysis for each key finding, including a description of uncertainties.
- NCA4 (2017/2018) was an further expanded effort published in two volumes: I Climate Science Special Report, and II Impacts, Risk, and Adaptation in the United States. This was the first NCA report to devote significant effort to assessing climate science.
- NCA5 (2023) returned to a single volume format, reducing discussion of climate science to a cursory two chapters, with continuing with a focus on regional and sectoral impacts of climate change. NCA5 expanded its remit to topics that are arguably outside the purview of the USGCRP, focusing on “Climate Action” and policy recommendations with a social justice emphasis. NCA5’s self-description is reproduced as Appendix II.

These successive interpretations of the NCA are poorly aligned with the GCRA’s statutory requirements. Only NCA4 gives serious consideration to climate science, which receives the great majority of USGCRP funding, and even then misrepresents some important points (Section 1.4 below offers an example). Natural climate variability is essentially dismissed as unimportant in NCA4 and barely mentioned in NCA5 in most contexts, despite the mandate to include both human-caused and natural climate change. Most significantly, NCA5 has redirected the focus away from climate science and even the hazard elements of impacts, towards evaluation of societal vulnerabilities and advocacy for particular policy options, especially wind and solar power. The cover image for the NCA5 Report is the installation of a solar panel.

1.3 Standards for Assessing NCA Products

Beyond the statutory requirements stated above, we draw attention to two other pertinent standards. President Trump’s executive order of May 23, 2025, “Restoring Gold Standard Science” enumerates some of the characteristics of good science:

- i. reproducible;
- ii. transparent;
- iii. communicative of error and uncertainty;
- iv. collaborative and interdisciplinary;
- v. skeptical of its findings and assumptions;
- vi. structured for falsifiability of hypotheses;
- vii. subject to unbiased peer review;
- viii. accepting of negative results as positive outcomes; and
- ix. without conflicts of interest.

Although these should be self-evident to those trained in science, it is surprising that some scientists have found them controversial (Dellawalla et al. 2025).

There are other desiderata for scientific reports that will be highly influential on climate policymaking. Among them are statements about the strength of climate knowledge. The IPCC’s approach is based on judgment of the available evidence and agreement among experts. More sophisticated knowledge characterizations for risk management include (Arven 2017):

- The degree to which the assumptions made are reasonable/realistic based on background knowledge
- The degree to which data/information exists and are reliable and relevant
- The degree to which there is disagreement among experts (including those from different environments or academic fields)
- The degree to which the phenomena involved are understood and accurate models exist
- The degree to which the knowledge has been thoroughly examined with respect to unknown knowns

Good climate and energy policies balance the risks and benefits of a changing climate against the world's growing demand for reliable and affordable energy. To strike that balance, policymakers must understand at least two complex and nuanced topics: the certainties and uncertainties of climate science and the technoeconomic realities of energy systems. Experts in those subjects have a responsibility to communicate their understanding to non-experts clearly, completely, and without bias.

Expertise in energy systems resides largely in the private sector, where it is essential to providing the reliable and affordable energy services that are the lifeblood of society. Understanding is therefore continually refined and tested by the discipline of the marketplace. In contrast, climate science expertise is found largely in the non-profit realm of universities and government laboratories and so has a more academic character.

In recent decades, climate science has engendered passion and emotion. Indeed, some younger climate scientists have gone into the field to “save the planet.” Further, the field of climate science has been politicized by NetZero mandates. It is then not surprising that objectivity can suffer when climate scientists communicate their understanding to non-experts. This lack of objectivity usurps the public's right to make informed choices and undermines their confidence in the scientific enterprise.

In 1980, then-President of the National Academy of Sciences Philip Handler identified the problem in an editorial (Handler 1980) that resonates eerily four decades later:

Difficulty arises in the scientific community from confusion of the role of scientist *qua* scientist with that of scientist as citizen, confusion of the ethical code of the scientist with the obligation of the citizen, blurring the distinction between intrinsically scientific and intrinsically political questions. When scientists fail to recognize these boundaries, their own ideological beliefs, usually unspoken, easily becloud seemingly scientific debate.

1.4 When Peer Review Fails

Peer review of reports like IPCC and NCA products is not a silver bullet that guarantees quality. The peer review process for these reports differs in some important respects from traditional peer review in academic journals. First, during the open review phases of early NCA drafts reviewers are volunteers who self-select what parts of the report to read, whereas the editors of academic journals editors recruit reviewers with relevant expertise and assign them to specific papers. As a result, there is no guarantee at that stage that any particular section of an NCA report was reviewed by anyone, let alone by someone with a perspective that differs from the authors. In fact, many potential reviewers have given up over the years because their input has systematically been ignored. The

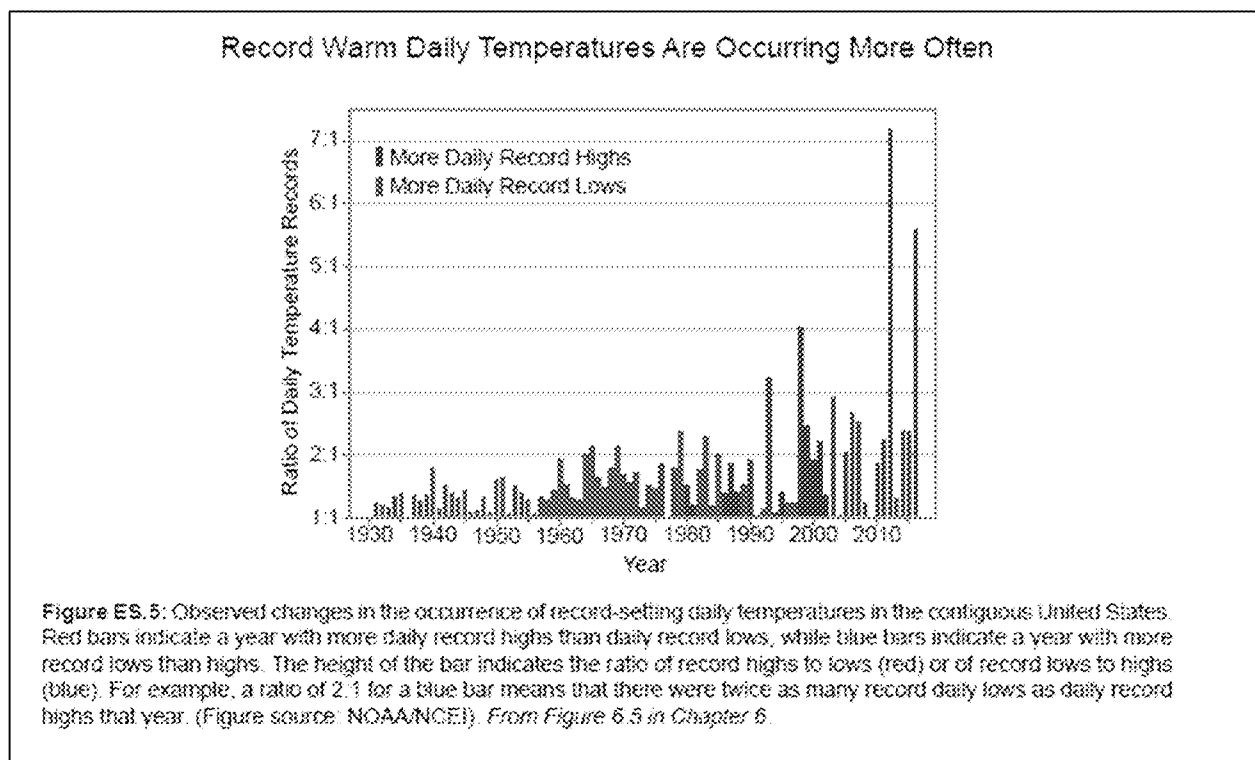
introduction of a NASEM review stage is at best a partial remedy for this. However, NCA authors have near complete authority whether to accept or reject review comments. By contrast, the Editor of an academic journal mandates the author to respond, and the reviewer and Editor assess its adequacy. Finally, the work of an NCA chapter author team is guaranteed to be published, whereas academic journals routinely reject papers that do not pass review.

These points are important to bear in mind because some readers might dismiss any criticism of NCA products out of hand on the grounds that they were “peer reviewed”. But the test of a report is whether its contents are a valid representation of the available evidence. Here we give an example in which NCA4 gave prominence to a figure that completely misrepresented the underlying data and which evaded peer review to do so. Further details can be found in Koonin (2024).

As shown in CWG25 Section 6.3 the number of heat extremes in the U.S. peaked in the 1930s and has declined ever since. Considering cold and hot extremes together the U.S. the U.S. climate has become more moderate over time. NCA4’s Part I says (prominently and with *Very High Confidence*) on Page 19 of the Executive Summary:

There have been marked changes in temperature extremes across the contiguous United States. The number of high temperature records set in the past two decades far exceeds the number of low temperature records.

and offers this figure in support:

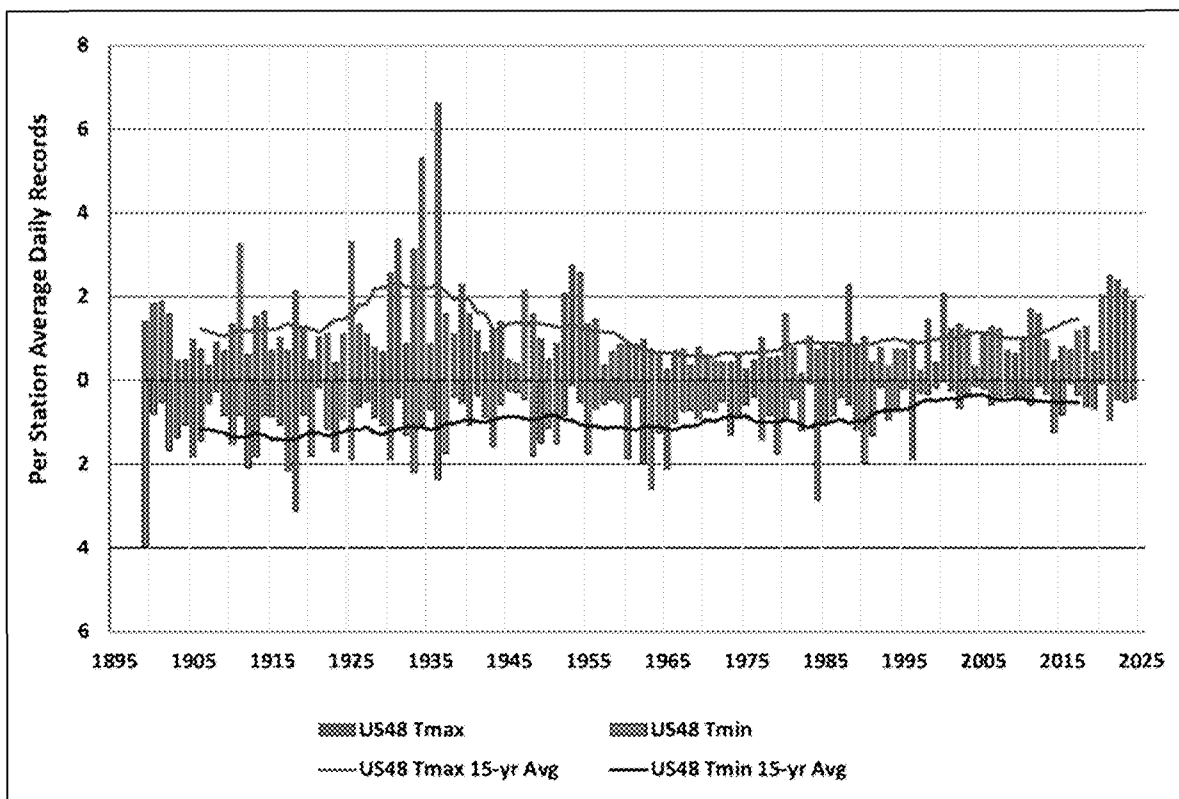


The figure appears to validate the claim that record warm daily temperatures are occurring more often. But the underlying data do not. Rather, they show that extreme heat in the U.S. peaked in the

1920s and 1930s and declined thereafter, as supported by Figure 6.4 deep within the CSSR itself (reproduced in our Section 4.2 below).

Figure ES.5 does not even show what its title implies, as it displays not simple counts of cold and warm extreme events, but rather ratios of the two counts. In fact, both types of extremes declined over the sample interval, but cold events declined more than warm events, so the ratio of warm extremes to cold extremes increased. By graphing the ratio instead of counts, NCA4 creates a visual impression opposite to what is in the data.

Figure 6.3.3 of CWG25 (reproduced below) shows the results of a proper analysis of the data – defining each record as the singular extreme in the sample interval, displaying numbers of warm and cold records separately, and beginning the analysis in 1899 rather than 1930. It makes evident the exceptional heat of the 1920s and especially the 1930s, peaking in 1936. The increased heat of the past five years is too brief to be deemed climatically significant and, in any event, occurred after the CSSR was published in 2017. The frequency of cold records has declined, especially over the last quarter of the period in which only 13 percent of the extreme cold events were measured. In contrast, 25 percent of the heat records were achieved in the last quarter, which is consistent with statistical expectations. As a result, the ratio of heat to cold extremes shown in Figure ES.5 of the CSSR explodes in recent decades. The overall reduction in numbers of both cold and hot extremes over the past century indicates a climate *less* prone to extremes, in sharp contrast to the message of NCA4 Figure ES.5.



Number of daily record High (red) and Low (blue) temperatures for warm and cold seasons in the CONUS. The lines represent the 15-year running, centered average. Source: 1,211 USHCN stations supplemented as needed to achieve a minimum of 92 percent of observations in the 126-

year period since Dec 1898. US48: contiguous U.S. states. Tmax: maximum temperature. Tmin: minimum temperature. Source: CWG25 Figure 6.3.3.

The National Academies' expert review panel criticized the discussion of temperature extremes in a late draft of the CSSR. In reference to the CSSR's Key Finding 2 of Chapter 6, they said:

Further, it is difficult to understand how a statement that includes increases in extreme warmth can be associated with a high confidence or extremely likely statement, given that most of the graphics in this chapter show a decrease in extreme warmth in the historical record.

The Federal official in charge of the CSSR (Michael Kuperberg, Executive Director of the USGCRP) responded to the Academies' review by noting that

Almost every recommendation from the NAS was incorporated [in the final version]... and a new figure was added on changes in record high and low temperatures

The "new figure" referred to is the Figure ES.5, which did not appear in the draft reviewed by the Academies' panel. It seems unlikely that the Academies panel ever saw that figure because they surely would have commented if they had and it wouldn't have survived to publication. And the figure's problems were evidently not flagged (or were ignored) in the subsequent internal government reviews.

With this background we now present our critique of NCA5.

2 NCA5 OVERVIEW CHAPTER: HYPERBOLIC ADVOCACY LANGUAGE AND UNSCIENTIFIC TONE

NCA5 Chapter 1, "Overview", holds a prominent place in the Report since it summarizes the entire report and is the only section that many will read. Although the later chapters of NCA5 contain much sound scholarly content, Chapter 1 is marred by an activist tone and language that aggressively promotes mitigation policies. As such, this chapter adds an imprimatur of scientific authority to oversimplified declarations of opinion about public policy. Many examples can be cited; here we note a few that are particularly egregious.

Chapter 1 opens as follows:

The more the planet warms, the greater the impacts. Without rapid and deep reductions in global greenhouse gas emissions from human activities, the risks of accelerating sea level rise, intensifying extreme weather, and other harmful climate impacts will continue to grow. Each additional increment of warming is expected to lead to more damage and greater economic

losses compared to previous increments of warming, while the risk of catastrophic or unforeseen consequences also increases.

This statement presupposes that all warming is anthropogenic, that all warming is bad and causes economic damage, and that warming intensifies extreme weather. Such sweeping generalizations go well beyond what science has or can establish. The statement also refers to growing risks without saying whether they were large to begin with -- a small risk that grows may still be a small risk, and a large risk may be only incrementally worsened. A scientifically-sound version of this paragraph would instead say something like the following:

The Earth is warming because of a combination of natural and anthropogenic influences. This warming will generate a mix of benefits and harms that varies by region, to which society should be prepared to adapt. Some types of extreme weather have worsened recently, while others have not changed or have even declined in intensity. Reducing emissions of greenhouse gases might slow the warming although such policies have proven to be costly and disruptive, so any climate actions to be weighed against the potential benefits.

On the next page the Overview states:

Each additional increment of warming leads to greater risks [here it lists 7 key components of society including food security and the economy]... Without deeper cuts in global net emissions, climate risks to the US will continue to grow... Action to limit future warming and reduce risks can have near-term benefits and opportunities: low-carbon energy jobs, Improved air quality, Health benefits, Economic benefits..."

The authors write as if climate policy does not involve trade-offs and all measures to reduce future warming will be effective and beneficial. But the vast body of scholarship on climate science and economics does not support such simplistic claims. Not every additional increment of warming leads to economic harms; in fact, NCA5 Chapter 19 acknowledges that there will also be benefits. Nor is climate policy guaranteed to create jobs or benefit the economy; in many cases it has done the opposite. Such deceit is a disservice to policymakers.

Pages 8 and 9 of the Overview promote renewable energy options by noting, correctly, that the leveled costs of wind/solar generation have fallen sharply since 2010, and so offers this rationale for pursuing deep emission reductions:

Recent growth in the capacities of wind, solar, and battery storage technologies is supported by rapidly falling costs of zero- and low-carbon energy technologies, which can support even deeper emissions reductions. For example, wind and solar energy costs dropped 70% and 90%, respectively, over the last decade, while 80% of new generation capacity in 2020 came from renewable sources.

Yet it has long been known that intermittent renewables generation must be supplemented by dispatchable generation to meet grid reliability standards, and that doing so (e.g., through natural gas, fission, or storage) significantly increases the cost of electricity. Further, there are yet unmet synchronization challenges in transmission grids with heavy penetration of wind and solar power. Here again it is advisory malpractice not to acknowledge these facts.

Page 14 of the Overview presents future emission scenarios with the following description: "Climate modeling experts develop global climate projections for a range of plausible futures." The word

“plausible” is applied to all of the scenarios. The accompanying Figure includes both SSP3-7.0 and SSP5-8.5, the latter reaching the same radiative forcing as RCP8.5. The Figure does not compare observed emissions with previous projections nor does it caution readers that SSP3-7.0 and SSP5-8.5 are extreme worst case scenarios that, like RCP8.5, have been heavily criticized in the scientific literature (CWG25 3.2.1). By describing the entire envelope of emission projections as “plausible” the report opens the door to later presenting impacts associated with extreme and implausible emission scenarios as part of a baseline “business-as-usual” future.

Page 17 of the Overview introduces the discussion of risks from extreme weather events by saying “Harmful impacts from more frequent and severe extremes are increasing across the country.” This creates the impression that disaster losses are driven by trends in extreme weather. While the section goes on to acknowledge that some of the increase is due to increases in the value of assets at risk it then invokes the NOAA Billion Dollar Dataset as evidence of extreme weather getting worse. Scientists have shown that this is an invalid metric (CWG 10.2) since it measures the growth of the economy not the frequency of extreme weather, and indeed NOAA has recently withdrawn the data product (Pielke Jr. 2024, 2025). Even though it was still distributed by NOAA at the time of the NCA5, the report authors should have assessed it skeptically and seen that it was unfit for the purpose of measuring climate trends.

Page 23 of the Overview states, in large font:

Climate changes are making it harder to maintain safe homes and healthy families; reliable public services; a sustainable economy; thriving ecosystems, cultures, and traditions; and strong communities.

It is pointless to try to evaluate this statement on scholarly grounds; it is self-evidently hyperbolic. This kind of language doesn’t belong in a scientific assessment report. Its prominent inclusion points not only to the willingness of NCA5 authors to promote alarm, but also the ineffectiveness of the review process in not ensuring such statements are removed.

3 OVERCONFIDENCE WHEN STATING CONCLUSIONS

3.1 Inflated certainty levels

Overconfidence in stating conclusions is an endemic problem in NCA5. The authors frequently make sweeping generalizations without appropriate caveats or acknowledging uncertainties. The overconfidence begins with inflated language to describe certainty levels.

NCA5 uses specific terms to convey information about scientific confidence associated with important finds, observations and projections. The Front Matter of NCA5 states that

confidence in a finding is based on the type, amount, quality, strength, and consistency of evidence; the skill, range, and consistency of methods to detect, evaluate, attribute, and interpret climate trends; and the degree of agreement across scientific information sources.

and Table 1 from the Front Matter provides calibrated language for confidence assessment:

Very high: Strong evidence (established theory, multiple sources, well documented and accepted methods, etc.). High consensus

High:	Moderate evidence (several sources, some consistency, methods vary and/or documentation limited, etc.). Medium consensus
Medium:	Suggestive evidence (a few sources, limited consistency, methods emerging, etc.) Competing schools of thought.
Low:	Inconclusive evidence (limited sources, extrapolations, inconsistent findings, poor documentation and/or methods not tested, etc.). Disagreement or lack of opinions among experts.

This terminology is inflated: *high confidence* with just moderate evidence and medium consensus; *medium confidence* with only suggestive evidence and competing schools of thought. This inflation in terminology leads to overconfidence in conclusions.

Even with this inflated terminology, NCA5 further inflates the confidence level of many of its conclusions to well beyond what the IPCC has concluded with more thorough justification, and also by incorrectly applying its own standards. An example is the conclusion about anthropogenic influence on climate change, arguably one of the most important scientific statements of the report.

Key Message 3.1 Traceable Account states:

There is *very high confidence* that emissions of GHGs from human activities, fossil fuel use in particular, have unequivocally caused *all* global warming observed over the industrial era.

while the corresponding statements from IPCC AR5 and AR6 are

AR5: It is *extremely likely* that *more than half* of the observed increase in global average surface temperature from 1951 to 2010 was caused by the anthropogenic increase in greenhouse gas concentrations and other anthropogenic forcings together.” (IPCC, 2013)

AR6: The *likely* range of total human-caused global surface temperature increase from 1850–1900 to 2010–2019 is 0.8°C to 1.3°C, with a best estimate of 1.07°C. It is *likely* that well-mixed GHGs contributed a warming of 1.0°C to 2.0°C, other human drivers (principally aerosols) contributed a cooling of 0.0°C to 0.8°C, natural drivers changed global surface temperature by –0.1°C to +0.1°C, and internal variability changed it by –0.2°C to +0.2°C. It is *very likely* that well-mixed GHGs were the main driver of tropospheric warming since 1979.

The IPCC AR5 and AR6 statements provide likelihood assessments but not a confidence level. While NCA5 claims with *very high confidence* that fossil fuels have unequivocally caused *all* global warming, AR5 refers to “*more than half* of the observed warming” and AR6 provides a more nuanced statement that relates to a *likely* range of warming contributed to by human drivers.

3.2 Overstating findings in underlying sources

Although we did not do a detailed audit of NCA5’s use of source material, spot checks turned up evidence of a pattern of overstatement.

Chapter 2 page 11 reports on an increase in precipitation in some areas and attributes it to “climate change”:

Many eastern regions of the country are getting wetter (Figure 2.4). Average annual precipitation from 2002-2021 was 5%-15% higher relative to the 1901-1960 average in the central and eastern US, a trend attributable to climate change.

Note that the attribution of various changes to “climate change” is misleadingly ambiguous. Because NCA5’s Glossary defines “climate change” as a change in climate for any reason, the statement is a tautology and so the attribution is superfluous. But because the popular perception of climate change is anthropogenic, its gratuitous inclusion effectively attributes the changes to greenhouse gas emissions. The NASEM review (pp. 23-24) commented on this problem but their comment was ignored.

The change metric in NCA5 Figure 2.4 is non-standard; we will discuss NCA5’s inconsistent choices of time scales of analysis below. The claims were attributed to Knutson and Zeng (2018). But Knutson and Zeng did not say these things. They examined linear trends over 1901 – 2010, 1951 – 2010 and 1981 – 2010. They did not compare average rainfall over 2002 - 2021 to average rainfall over 1901 – 1960, if only because their study was published in 2018. For 1981-2010, they noted stronger trends in some areas but cautioned that such changes are consistent with natural variability, and they did not claim attributable trends were observed over the United States:

Observed annual precipitation trends over the recent 30-yr period 1981–2010 (Fig. 5) have generally stronger magnitudes (in mm yr⁻¹ decade⁻¹) than observed trends for 1901–2010 or 1951–2010. This is as expected since trends over a shorter period have stronger potential for occurrence of pronounced temporary trends due to internal variability alone. Only 9% of the analyzed area has detectable and attributable anthropogenic influence (categories –3, –2, +2, +3), which represents less than one-third of the fractional areal coverage of such trends for 1901–2010 (29%). ... Eight percent of the analyzed area has attributable anthropogenic *increases* (categories +2, +3), including parts of eastern Europe, northern Asia, northern Australia/Maritime Continent, and tropical Africa.

As another example of overstating findings, NCA5’s Chapter 2 page 18 states

There is robust evidence that human-caused warming has contributed to increases in the frequency and severity of the heaviest precipitation events across nearly 70% of the US.

This is allegedly attributed to two papers Diffenbaugh *et al.* (2018) and Kirchmeier-young and Zhang (2020). Diffenbaugh *et al.* presented ratios of observed occurrences of extreme events to simulated occurrence rates in CMIP6 models run with only natural forcings. They report that for 79% of the U.S. extreme rainfall event frequencies are currently higher than in model simulations, and the ratio of occurrences will rise under future warming simulations. This is not “robust” evidence of anthropogenic influence since it requires readers to assume that climate models provide accurate simulations of regional precipitation patterns, something that even IPCC AR6 admits is uncertain (AR6 WGI SPM Box SPM 1.2, SPM Section C.1.3).

Kirchmeier-Young and Zhang looked at extreme 1- and 5-day events in North America and, using three GCMs, found

A signal of combined anthropogenic and natural external forcing can be detected in the intensification of extreme precipitation at the continental scale over North America. In some cases, this intensification can be attributed to human influence specifically.

However, they noted large differences among the three models in their simulated precipitation changes. Also, two of the three models failed to yield attribution for 5-day events for the North America mean. In other words the models disagreed on whether the observed changes were anthropogenic. Both cited references utilized the implausible RCP8.5 scenario and began their “historical” observational records only in 1961. Here again this is not “robust” evidence, it is merely suggestive, particularly since other studies have found natural variability predominant.

3.3 Technical example: Emergent constraints

Some of the overconfidence expressed by NCA5 arises by omitting discussion of counterevidence in the peer reviewed literature. An example is the topic of “emergent constraints”. Chapter 3 page 17 invokes this concept to support its claim that key uncertainties have been reduced:

An approach to reduce uncertainty in climate change projections has matured over the past decade. It is known as “emergent constraints.” The term refers to strong statistical relationships between highly uncertain future climate parameters and observable trends or variations in the current climate, along with a physical explanation of this relationship.

Emergent constraints appeared in the climate modeling literature as an attempt to tie GCM behavior to climate observations in hopes of generating insight into real-world equilibrium climate sensitivity to a doubling of carbon dioxide (ECS). Climate models exhibit a wide range of ECS values. The idea of emergent constraints is to examine whether the models with shared sensitivity values also share a common representation of some climate process (usually related to clouds) that might indirectly influence ECS. Suppose, for instance, that in low-ECS models the total cloud fraction in the tropics is strongly correlated with that in the southern midlatitudes but in high-ECS models the correlation is weak. Then researchers could examine whether the observed correlation is strong or weak and draw a conclusion about which type of model, and therefore which ECS value, is more likely.

A problem in the emergent constraint literature is that there has been a proliferation of proposed correlations with little physical motivation. As shown by Schlund *et al.* (2020) many emergent constraints patterned on CMIP5 models (Coupled Model Intercomparison Project No. 5, used for the IPCC 5th Assessment Report) failed to work on CMIP6 models (used for the IPCC 6th Assessment Report). In other words, the observed correlations in CMIP5 models between ECS and cloud processes failed to show up in CMIP6 models, indicating that they were likely spurious rather than clues to physical processes governing the climate system. As a result, emergent constraints estimated on CMIP5 models increased the uncertainty of ECS, rather than narrowing it as intended and as claimed by NCA5.

Schlund *et al.* summarized the problem as follows [**boldface** used for emphasis]

In this study, we systematically analyze 11 published emergent constraints on ECS that have mostly been derived from models participating in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) project... The focus of the study is on testing if these emergent constraints hold for [Earth System Models] participating in the new Phase 6 (CMIP6). Since none of the emergent constraints considered here have been derived using the CMIP6 ensemble, CMIP6 can be used for cross-checking of the emergent constraints on a new model ensemble. **The application of the emergent constraints to CMIP6 data shows a decrease in skill and statistical significance of the emergent relationship for nearly all constraints, with this decrease being large in many cases.** Consequently, the size of the

constrained ECS ranges (66% confidence intervals) widens by 51% on average in CMIP6 compared to CMIP5.

Yet NCA5 described the use of emergent constraint analysis as a great “advance” that reduced uncertainty.

4 RELIANCE ON SHORT TIME PERIODS FOR TREND ANALYSIS

In CWG25 Chapter 6 we discussed the need for care in the choice of time scale when making claims about trends in extreme weather. We provided examples from analysis of river flooding, heatwaves, and extreme precipitation to show how assertions about apparent trends based on short data sets fall apart when looking at longer versions of the same data sets. Here are some examples of this problem from NCA5.

4.1 Average and Extreme Precipitation

McKittrick and Christy (2019) showed that apparently significant positive trends in U.S. average and extreme precipitation over the NCA4 interval (1901 – 2016) disappeared on longer samples (extending back as far as the 1840s, depending on location) or on a shorter interval coinciding with the final 40 years of the data then available (1978 – 2017). In CWG25 Section 6.4 we presented analyses of updated data for the same locations (and many others), in all cases finding both considerable regional heterogeneity and that trends detectable on one time scale are often not detected on longer or shorter time scales. These findings argue against simple attribution of changes to anthropogenic influences.

NCA5 did not continue the NCA4 precedent of using the post-1901 interval as the time scale for its precipitation discussion; instead it refers to changes “since the 1950s”; NCA5 Figure 2.8 suggests 1958 might be the intended start date. Under Key Message 2.2 “Extreme Events Are Becoming More Frequent and Severe” (p. 2-16) NCA5 states (p. 2-18):

Rainfall is becoming more extreme
Since the 1950s, there has been an upward trend in heavy precipitation across the contiguous US. This increase is driven largely by more frequent precipitation extremes, with relatively smaller changes in their intensity.

In addition to our concerns that inferences about trends are contingent on choice of time scale, we cannot reproduce the finding that positive trends are observed in extreme precipitation across all CONUS regions. We extended the data used in CWG25 (McKittrick and Christy 2025) to include 141 stations across the US in the Pacific Coast, Midwest, Northeast and Southeast regions (Christy 2025). See details in Appendix 3. Many post-1950 trends are positive but statistically insignificant depending on the measure of extreme precipitation. It is possible to find locations that support the NCA5 position, such as the Southeast post-1950, but results are not robust to selecting longer or shorter time scales of analysis nor do they generalize across all regions.

The following is a more accurate summary of what U.S. data show.

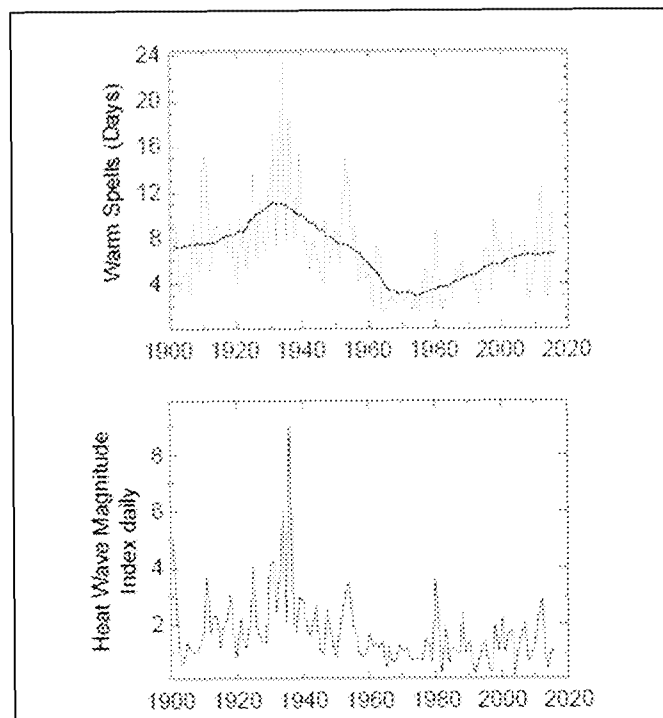
There are regionally heterogeneous changes in average and extreme precipitation. Positive trends in annual average rainfall and extreme events (defined either as the annual maximum or the number of exceedances of the 99th percentile value) are generally weak or non-existent when looking at samples exceeding 130 years in length. Significant trends can be found when beginning the sample in the 1950s although in most cases the trends weaken and become insignificant when looking at the post-1980 interval. This makes attribution of changes in precipitation to anthropogenic warming difficult.

4.2 Heatwaves

In contrast to NCA5, NCA4 examined heat extremes across the entire 20th century, pointing out that peak heat wave activity was reached in the 1930s and has decreased since then, and that recent increases are confined to areas west of the Rockies:

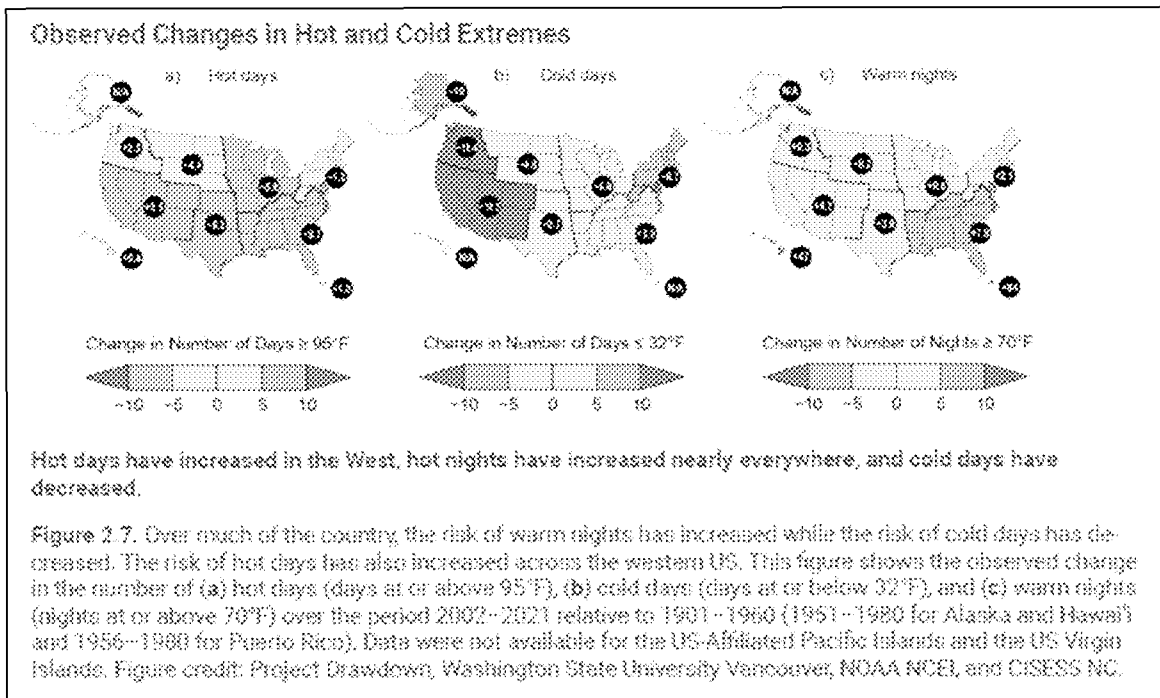
[The] warmest daily temperature of the year increased in some parts of the West over the past century, but there were decreases in almost all locations east of the Rocky Mountains. In fact, all eastern regions experienced a net decrease, most notably the Midwest (about 2.2°F [1.2°C]) and the Southeast (roughly 1.5°F [0.8°C]).

Since the mid-1960s, there has been only a very slight increase in the warmest daily temperature of the year (amidst large interannual variability). Heat waves (6-day periods with a maximum temperature above the 90th percentile for 1961–1990) increased in frequency until the mid-1930s, became considerably less common through the mid-1960s, and increased in frequency again thereafter. As with warm daily temperatures, heat wave magnitude reached a maximum in the 1930s. (NCA4 pp. 190-191)



U.S. Heat waves since 1900. Source: NCA4 Figure 6.4

Contrast this careful and factual language with NCA5 Key Message 2.2: “Extreme Events Are Becoming More Frequent and Severe.” This blanket statement is followed by NCA5 Figure 2.7 (reproduced below) which shows the number of hot days, cold days and warm nights (respectively in panels a—c) over the period 2002-2021 compared to 1901-1960. [Presumably these are annual counts, although not stated in the caption.]



Close inspection shows that this figure contradicts the NCA5 Key Message with respect to heatwaves and instead reinforces the position of NCA4. Notwithstanding Key Message 2.2 the leftmost panel in Figure 2.7 above shows that over most of CONUS the number of extreme heat days has decreased in recent decades compared to the prior century.

The accompanying discussion in NCA5 becomes convoluted as it appears to be aimed at supporting the Key Message despite the contrary evidence. NCA5 chapter 2 elaborates on Key Message 2.2 by saying (page 16):

Observations show an increase in the severity, extent, and/or frequency of multiple types of extreme events. Heatwaves have become more common and severe in the West since the 1980s (*high confidence*).

But while it mentions the increase in hot days in the West NCA5 fails to mention the decrease everywhere east of the Rockies. On the next page (page 17) it raises the comparison to the 1930s then switches to discussing global counts:

By some measures, the most extreme heatwaves on record in the United States occurred during the Dust Bowl era of the 1930s. ... Globally such heatwaves are becoming more frequent, and in recent decades the western United States has been following those trends.

The reference to a global trend seems to be an attempt to tie heatwaves to anthropogenic climate change. But the obvious question, unaddressed by NCA5, is why one region follows the global pattern of increasing heatwaves while most of the country is trending in the opposite direction. These issues are addressed in Chapter 6 of CWG25, demonstrating that the range and magnitude of extreme temperatures (10s of degrees) are driven more by natural variability than by the small anthropogenic forcing. The analysis in CWG25 shows that for both (a) hot days ($\geq 95^{\circ}\text{F}$) and (b) number of days in heatwaves, the current decade is no hotter than a century ago in the U.S. Thus, the NCA5 claim that “multiday heatwaves have become hotter, more frequent, larger, and longer lasting in recent decades,” is simply false when expanding the temporal and spatial domains to encompass all available data (Chapter 6 and Figure 6.3.6 of CWG25).

NCA5 then pointed to the dramatic Pacific Northwest heatwave of 2021. CWG2025 Section 8.6.1 discussed this event in detail, reviewing the multiple peer reviewed studies that explained the unusual meteorological context was unrelated to human-caused climate change, a point omitted from the NCA5 discussion.

NCA5 finally addresses the declining heatwave trend in CONUS east of the Rockies but attempts to reframe it by focusing on urban warm spells.

[The] number of very hot days has actually decreased across the central and eastern regions due to summer cooling trends in the region (Figure 2.7; Ch. 22). This does not, however, mean the central and eastern US are not affected by heat. The impacts of extreme high temperatures are more severe if such conditions persist for several days, and overall, multiday heatwaves have become hotter, more frequent, larger, and longer lasting in recent decades. Across 50 large US cities, the US Global Change Research Program heatwave indicator (<https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves>) shows that the average number of heatwaves has doubled since the 1980s, and the length of the heatwave season has increased from about 40 days to about 70 days.

We discussed part of NCA5 in CWG25 Section 6.3. The figure referenced by NCA5 uses an *ad hoc* definition of heat wave, namely two consecutive days with minimum nighttime temperatures above the 85th percentile, and an *ad hoc* time scale which begins in the 1960s, the coldest decade in the last century, thus suppressing any comparison to the 1930s. Further, nighttime temperatures in urban areas have increased faster than daytime temperatures (which NCA5 acknowledges), but this is a signature of urban heat islands and not a good metric of climate change. CWG25 noted as well that the occurrence of hot days ($\geq 95^{\circ}\text{F}$) has recently increased in the West, but declined in the remainder of the country, and in the nationwide average, since 1899.

5 INADEQUATE TRACEABLE ACCOUNTS

NCA3 began the practice of including a section on Traceable Accounts at the end of each chapter. This is the description from NCA5:

Each chapter concludes with a section entitled Traceable Accounts, which provides information on the overall process used to develop the chapter as well as a separate Traceable Account section for each Key Message. These Traceable Accounts describe the supporting evidence behind each Key Message, the process and rationale authors used in reaching their conclusions, and the author team's expert assessment of the confidence in and, where applicable, likelihood of these conclusions. As such, Traceable Accounts provide information about the state of the science, document sources of uncertainty, identify research gaps, and allow traceability to data and resources.

The Traceable Accounts for each Key Message includes the following sections:

- Description of Evidence Base
- Major Uncertainties and Research Gaps
- Description of Confidence and Likelihood

The Traceable Accounts could have addressed the statutory requirement that the NCA discuss scientific uncertainties. They could also help satisfy the Executive Order for Restoring Gold Standard Science by addressing reproducibility, transparency, communication of error and uncertainty, and skepticism of findings and assumptions. However, the Traceable Accounts in NCA5's Chapters 2 and 3 are uneven, often superficial and uninformative.

An example of a deficient Traceable Account is NCA5's Key Message 2.2: "Extreme Events are Becoming More Frequent and Severe". The "Description of the Evidence Base" offers two paragraphs, the first summarizing the findings and the second generically describing the types of data that can be used for storms. "Major Uncertainties and Research Gaps" focuses on the uneven distribution across U.S. populations due to differences in exposure and vulnerability. The only limitations in data referred to are the lack of a long-term record of lightning and the lack of homogenized daily and hourly temperature data apart from reanalysis products.

But the most astonishing deficiency is in the "Description of Confidence and Likelihood." One of the statements in Key Message 2.2 is:

Hurricanes have been intensifying more rapidly since the 1980s (high confidence) and causing heavier rainfall and higher storm surges (high confidence).

The Description of Confidence and Likelihood includes the following statement:

Basic physical understanding and climate models both provide robust explanations for the links between climate change and observed changes in these extremes: this is why the authors also have high confidence that storms are delivering more rainfall and high confidence that storm surges are becoming higher.

No reference to journal publications or a specific data set is made anywhere in the Chapter regarding hurricane-induced precipitation or storm surge to support this *high confidence* conclusion.

The Traceable Accounts for the various Key Findings of Chapter 3 have some substantial inconsistencies. Consider

Key Message 3-1: Human activities have caused global warming.

Confidence and Likelihood: “There is *very high confidence* that emissions of GHGs from human activities, fossil fuel use in particular, have *unequivocally* caused all global warming observed over the industrial era. There is also *very high confidence* that changes in natural climate drivers have had globally small and regionally variable long-term effects over this period.”

The Uncertainties section addresses only uncertainties in radiative forcing by greenhouse gases. In contrast, the Traceability Analysis of Key Message 3-4 (“Humans Are Changing Earth System Processes”) raises the problem that relatively little is known about the role of natural variability at the regional scale. From its Description of Evidence Base:

In the last decade, there has been increasing recognition of the role of regional-scale natural variability in the past and future evolution of climate, as well as the fact that regional natural variability signals can be competitive with forced anthropogenic signals.

And from its Major Uncertainties and Research Gaps:

For example, the true natural variability of the climate system on decadal to centennial timescales could be larger than what we estimate from GCMs, which would further increase the irreducible uncertainty stemming from natural variability.

These statements are among the most scientifically credible in the entire NCA5 and they directly undercut the confidence assigned to Key Message 3-1.

There is also a generic problem in tracing NCA5’s Traceable Accounts. The Front Matter of NCA5 states:

Each figure and some tables are accompanied by a metadata survey, which can be accessed in the online version of the report by clicking on the eyeball icon above the figure or table (see the table below for explanations of additional icons used throughout the report). The metadata survey describes data sources, figure or table development methods, copyright information, and other important documentation.

Clicking on the eyeball icon does not reveal the metadata information, instead a “Contact Us” email appears, addressed to the USGCRP. This is clearly an inadequate way to archive the metadata information.

In summary, the Traceable Analyses examined here, with few exceptions, fail to meet the stated objectives set forward by the NCA.

6 OVEREMPHASIS ON EXTREME SCENARIOS

To respond to the GCRA mandate to “project major trends for the subsequent 25 to 100 years,” NCA5 relies on projections of future climate change based on estimates of future emissions (the so-called SSP scenarios) and/or specified levels of radiative forcing (the RCP scenarios). For the most part, NCA5 uses scenarios developed for the IPCC Assessment Reports.

In CWG Section 3.2.1 we presented a critical assessment of past and current IPCC scenario envelopes, showing that they have tended to overshoot observed emissions. The IPCC AR6 published in 2021 stated that "The likelihood of high-emission scenarios like RCP8.5 and SSP5-8.5 is considered low in light of recent energy sector developments." and that same year UN Climate Negotiators (COP) stopped using scenarios above 4.5.

NCA5 makes the following observations about the scenarios they use:

NCA5 authors were advised to assess the full range of scenarios available. (Front Matter)

Scenarios of future emissions and land-use change are developed as plausible alternatives, but no relative likelihood is attached to them. Some recent studies, however, have argued that the highest scenario, SSP5-8.5, is no longer plausible without a reversal of current trends in the adoption of renewables and energy efficiency. (Key Message 3.3 Traceable Analysis)

Despite acknowledging the issue, NCA5 otherwise ignored the problem. A keyword search of NCA5 of mentions of RCP/SSP scenarios finds over 50% referred to the extreme emissions scenarios RCP8.5/SSP5-8.5. Further, nine NCA5 figures (5.2, 6.9, 7.4, 11.3, 14.6, 22.13, 22.19, 27.9, 29.13) included *only* the 8.5 scenarios.

The problem of relying on extreme scenarios is particularly acute for NCA5's sea level rise projections. The sea level rise scenarios used in NCA5 do not relate directly to the SSP emissions scenarios, but rather to specified amounts of sea level rise by 2100. Table 4 of NCA5's "Guide to Using this Report" reproduced below shows that Low relates to 0.3 m (0.98 feet), Intermediate-Low relates to 0.5 m (1.64 feet), Intermediate relates to 1.0 m (3.28 feet), Intermediate-High relates to 1.5 m (4.92 feet), and High relates to 2.0 m (6.56 feet).

Table 4. Descriptive Terms for Common Sea Level Rise Scenarios Used in NCA5						
Future global mean sea level rise and sea level rise along United States coastline are shown for five scenarios in feet (and meters), relative to a 2000 baseline. The US values shown in the right half of the table are averaged across the US coastal regions, including the contiguous US, Alaska, Hawaii and the US-Affiliated Pacific Islands, and the US Caribbean. The national values shown in the table differ substantially from regional values. For example, sea level rise is higher in the Gulf Coast and lower or even negative in some parts of Alaska. In the next 30 years (2020–2050), sea level along the contiguous US coasts is expected to rise 0.92 feet (0.28 m), the same amount of sea level rise observed over the last 100 years (1920–2020). See Chapter 3 for regional sea level information. Adapted from Sweet et al. 2022. ⁹						
Sea Level Rise Scenario Descriptor	Global Mean Sea Level			United States		
Year	2050	2100	2150	2050	2100	2150
Low	0.49 (0.15)	0.98 (0.3)	1.31 (0.4)	0.59 (0.18)	0.98 (0.3)	1.64 (0.5)
Intermediate-Low	0.66 (0.20)	1.64 (0.5)	2.62 (0.8)	0.75 (0.23)	1.64 (0.5)	2.95 (0.9)
Intermediate	0.92 (0.28)	3.28 (1.0)	6.23 (1.9)	0.89 (0.27)	3.28 (1.0)	6.89 (2.1)
Intermediate-High	1.21 (0.37)	4.92 (1.5)	8.86 (2.7)	1.12 (0.34)	4.92 (1.5)	8.86 (2.7)
High	1.41 (0.43)	6.56 (2.0)	12.14 (3.7)	1.38 (0.42)	6.56 (2.0)	12.46 (3.8)

Table 4 from the Front Matter of NCA5

Considering only projections representing processes quantified with at least medium confidence, IPCC AR6 assessed global mean sea level projections for 2100 to fall between 0.2 and 1.6 m (5th—95th percentile range). Nevertheless, the range of sea level rise scenarios considered by NCA5 extends to 2.0 m. Further, NCA5 fails to include plausible lower scenarios, such as 0.2 m cited by the IPCC, which also corresponds to the average rate of sea level rise over the past century.

Chapter 9 of NCA5 offers the following predictions of sea level rise:

“Under a range of potential global warming levels, average sea level along US coastlines is *likely* to be between 12 and 20 inches above 2000 sea levels in 2050 (Figure 9.2).”

These values span from the Intermediate scenario to values slightly greater than the High scenario. They can be put into context by considering the observed global sea level rise from 2000-2024, approximately 3.39 inches (0.28 feet). NCA5 is thus projecting a sea level rise during 2025 and 2050 that is 3.5 to 5.8 times the rate observed during 2000-2024, an exceedingly implausible outcome. Chapter 9 further states:

“Looking toward the future, an 11 inch (28 cm) average rise along the contiguous US coastline is expected by 2050 (relative to 2020), with a *likely* range of 9-13 inches.”

...
“There is *high confidence* and it is *likely* that sea levels will rise about 11 inches (likely range of about 9–13 inches) between 2020 and 2050”

In summary, NCA5 presents future sea level rise scenarios that are not directly relatable to either SSP/RCP emissions scenarios nor to global warming levels. The NCA5 scenarios include two scenarios that are higher than the 95th percentile for the extreme emissions scenario RCP8.5 and include hypothesized ice sheet processes in which there is low confidence. Projections to 2050 require rates of sea level rise from 2025 to 2050 that are more than triple the rate observed during 2000-2024. Further, NCA5 ascribes *high confidence* to these sea level rise projections. CWG25 Section 7.3 provides further context for USGCRP projections of extraordinary sea level rise in the next 25 years.

More generally, NCA5’s inclusion, and even focus, on implausible extreme emissions scenarios supports projections of alarming impacts that are very unlikely to be driven by anthropogenic warming.

7 INADEQUATE NASEM REVIEW: TO BE ADDED

I THINK WE SHOULD DELETE THIS CHAPTER, IT ISN’T VERY STRONG

The National Academies of Science, Engineering and Medicine (NASEM) undertook a detailed review of the draft NCA5 (NASEM 2023). While they raised some of the same concerns that we have articulated herein, their review is superficial overall and appears to be written by authors who share many of the biases of the NCA5 team. There is an inordinate focus on social and policy issues (e.g., every chapter is assessed under the heading “Comments on Equity and Justice”), rather than on the underlying science. In our assessment NASEM failed to apply the serious rigor one would expect. A few extracted comments from it will illustrate. Note that NASEM review comments are included here in blue font for reference.

7.1 Substantive criticisms by NASEM

- summarize the valid points made by NASEM and check the NCA replies

7.2 Failures to challenge NCA5 flaws

NASEM praised Chapter 2, saying:

The chapter [2] meets the requirements of Section 106 of the GCRA.

Yet contrary to the requirements of Section 106, Chapter 2 did not adequately discuss natural variability let alone assess the full climate record available for quantifying natural variability. Chapter 2 actually minimizes natural variability by claiming (unsubstantiated) skill in attributing recent extremes to human causes. For example NCA5's Chapter 2 Introduction states,

"...recent advances in attribution science (KM 3.3) mean that the role of climate change in some extreme events can now be quantified in real time. For example, climate change made the record-breaking Pacific Northwest heatwave of June 2021 2° to 4°F hotter, and in 2017 ..."

CWG25 reviews the expert literature demonstrating that this particular event would have happened with or without climate change and that for CONUS, hot extremes are no more frequent now than they were in the past. NASEM did not challenge the unsubstantiated attribution claims in NCA5.

Notwithstanding NASEM's claim that the Chapter complies with Section 106 of the GCRA, it then acknowledged the absence of discussion of natural variability:

...the discussion and references regarding the role of natural climate variability and its regional differences are missing.

While a nod to natural variability is occasionally found in NCA5, it is usually followed by a "however" to emphasize human influence. One example is the statement just before the claim mentioned above pertaining to extreme event attribution: "There has always been extreme weather, which occurs even in an unchanged climate due to the natural variability of the Earth system. However, recent advances in attribution science (KM 3.3) mean that the role of climate change in some extreme events can now be quantified in real time..."

We pointed out (Section 4.2) that the evidence regarding heatwaves directly contradicts Key Message 2.2. NASEM did not mention this, instead it focused on a somewhat esoteric issue of terminology:

"Extreme Events Are Becoming More Frequent and Severe."

Key Message 2.2 is another generally well written key message. However, while the title of this key message includes the word "risk," the key message is exclusively about hazard. The Committee suggests rewriting the key message title to more accurately reflect the discussion on hazards.

The NASEM review appears to accept NCA5's use of short data records because it makes no critical remarks about the failure to assess long time series, except for its observation that the use of short records makes the omission of natural variability that much more of a problem:

It is also important to point out that the influence of natural climate variability becomes particularly strong when the climate trend is computed based on short periods of time or small geographic areas.

This comment was largely ignored in the NCA5 final text.

In sum, while the NASEM review might bestow the Academies' imprimatur on the NCA5 report, it does not necessarily add to its quality for two reasons. As we have demonstrated, the NASEM review falls short in rigor and completeness. And second, the NCA authors are not obligated to follow the NASEM recommendations in crafting their final product.

8 SUMMARY EVALUATION OF NCA5

whether NCA5: (1) complied with the USGCRP's statutory obligation, (2) adheres to the core tenets of Gold Standard Science, and (3) can suitably inform federal climate and energy policy.

The most straightforward evaluation of NCA5 is through its statutory requirements. While it is not within our purview to make definitive rulings on compliance, we believe there are several important aspects to consider when evaluating NCA5 against its statutory requirements. Add text per Seth's letter ...

~~Our expertise in climate science, the foundational area covered by NCA5, allows a different perspective, one that finds the coverage unbalanced and selective. Our review has identified numerous instances where NCA5 falls short of the quality and integrity expected of scientific document of this importance. Furthermore, our examination suggests that the entire process—from the selection of contributing authors to the handling of expert reviews—appears to have been systematically biased toward reinforcing predetermined conclusions and amplifying alarmist messaging rather than presenting a balanced scientific assessment. In short, NCA5 was written to persuade, not inform.~~

~~A third perspective for evaluating NCA5 is that of citizens interested in good policymaking. The changing climate is a legitimate public concern, as are concerns about cost of living, economic growth, employment opportunities, and other socioeconomic factors. We share the widespread belief that elected officials should have access to the highest quality information when crafting energy and climate policy decisions that must balance multiple concerns. From this perspective, NCA5 is a missed opportunity. What could have been a valuable contribution to informed tradeoffs instead became a misleading advocacy document that corrupts the policymaking process.~~

The National Academies of Science, Engineering and Medicine (NASEM) undertook a detailed review of the draft NCA5 (NASEM 2023). While they raised some of the same concerns that we have articulated herein, their review is superficial overall and appears to be written by authors who share many of the biases of the NCA5 team. There is an inordinate focus on social and policy issues (e.g., every chapter is assessed under the heading “Comments on Equity and Justice”), rather than on the underlying science. In our assessment NASEM failed to apply the serious rigor one would expect. A few extracted comments from it will illustrate. Note that NASEM review comments are included here in blue font for reference.

9 REFERENCES

- Aven, Terje (2017) "Improving Risk Characterisations in Practical Situations by Highlighting Knowledge Aspects, with Applications to Risk Matrices," *Reliability Engineering & System Safety* 167 (November 2017): 42–48
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832016306950>
- Climate Working Group (2025) Impacts of Carbon Dioxide Emissions on the U.S. Climate. Washington DC: Department of Energy, May 27, 2025.
- Dellawalla, Colette, Victor Ambrose, Carl Bergstrom *et al.* (2025) "Trump's new 'gold standard' rule will destroy American science as we know it." *The Guardian* May 29, 2025
<https://www.theguardian.com/commentisfree/2025/may/29/trump-american-science>
- Diffenbaugh, N.S., D. Singh, and J.S. Mankin, 2018: Unprecedented climate events: Historical changes, aspirational targets, and national commitments. *Science Advances*, 4 (2), 3354.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aao3354>
- Handler, Philip (1980) Public Doubts About Science. *Science* 208(4448) p. 1093
<https://www.science.org/doi/10.1126/science.208.4448.1093>
- Kirchmeier-Young, M.C. and X. Zhang, 2020: Human influence has intensified extreme precipitation in North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117 (24), 13308–13313. <https://doi.org/10.1073/pnas.1921628117>
- Knutson, Thomas and Fanrong Zeng (2018) "Model Assessment of Observed Precipitation Trends over Land Regions: Detectable Human Influences and Possible Low Bias in Model Trends" *Journal of Climate* 31(12) <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/31/12/jcli-d-17-0672.1.xml>
- Koonin, Steven (2024) *Unsettled: What Climate Science Tells Us, What It Doesn't, and Why It Matters*. ---; ---
- McKittrick, R., and J.R. Christy (2019). Assessing changes in US regional precipitation on multiple time scales. *Journal of Hydrology*, 578, 124074. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124074>
- McKittrick, R., and J.R. Christy (2025), "Data and Code for DoE Report 2025", Mendeley Data, V1, doi: 10.17632/8n9ks93vn7.1
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2023. *Review of the Draft Fifth National Climate Assessment*. Washington, DC: The National Academies Press.
<https://doi.org/10.17226/26757>.
- NCA4. (2017). *Climate science special report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* (D. J. Wuebbles, D. W. Fahey, and K. A. Hibbard, Eds.). U.S. Global Change Research Program.
<https://doi.org/10.7930/I0I964I6>
- NCA5. (2023). *Fifth National Climate Assessment* (A. R. Crimmins *et al.*, Eds.). U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/NCA5.2023.CH1>
- Pielke Jr., R. (2024). Scientific integrity and U.S. 'billion dollar disasters'. *npj Natural Hazards*, 1, Article 12. <https://www.nature.com/articles/s44304-024-00011-0>
- Pielke Jr., R. (2025, May 8). RIP NOAA's billion dollar disasters. The Honest Broker [Substack]. <https://rogerpielkejr.substack.com/p/rip-noaas-billion-dollar-disasters>
- Schlund, Manuel, Axel Lauer, Pierre Gentine, Steven C. Sherwood, and Veronika Eyring (2020) Emergent constraints on equilibrium climate sensitivity in CMIP5: do they hold for CMIP6? *Earth System Dynamics* 11 1233–1258 <https://doi.org/10.5194/esd-11-1233-2020>

APPENDICES

APPENDIX 1: Charge to the review

APPENDIX 2: Reproducibility of NCA5 claim of extreme precipitation trends

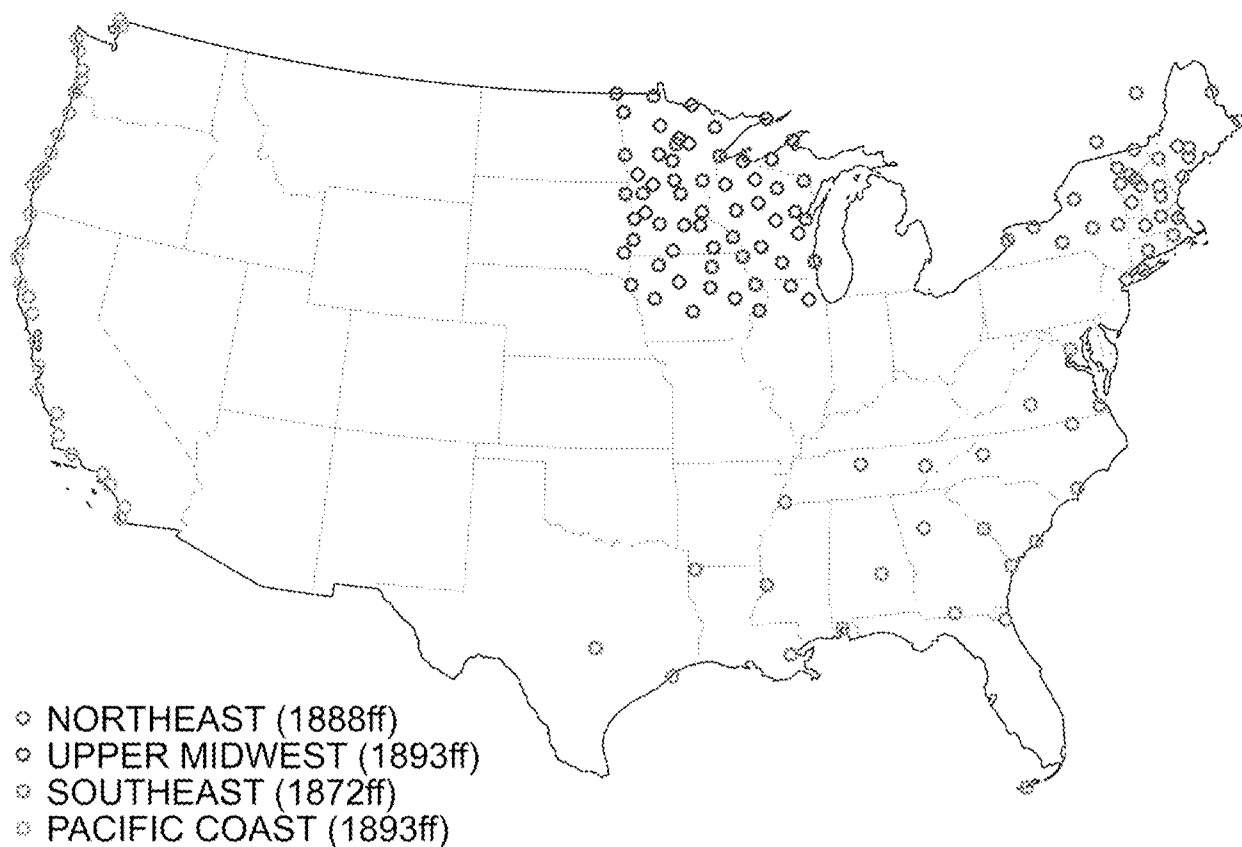


Figure A1: Stations used in the following analyses

Note: All data are available at Christy (2025). Methods as described in McKittrick and Christy (2019), code available at McKittrick and Christy (2025).

Table codes: (-) neg insignificant, -- neg significant, (+) pos insignificant, ++ pos significant.

Column 1: Measure

Column 2: Number of stations in that region

Column 3: Count of stations exhibiting a significant positive trend

Column 3: Count of stations exhibiting a significant negative trend

Column 5: Characteristic of region-wide trend

PACIFIC COAST

Since 1893:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	29	0	1	(-)
2-day average	29	0	1	(-)
Avg on non-zero days	29	0	9	--
Variability	29	1	0	(+)
Annual max	29	2	1	(+)
Number of 99 th pct exceedances	29	1	0	(-)

Since 1950:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	29	0	1	(-)
2-day average	29	0	1	(-)
Avg on non-zero days	29	0	4	(-)
Variability	29	2	3	(-)
Annual max	29	6	3	(-)
Number of 99 th pct exceedances	29	2	1	(-)

Since 1980:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	29	0	0	(-)
2-day average	29	0	0	(-)
Avg on non-zero days	29	0	1	(-)
Variability	29	0	0	(-)
Annual max	29	2	1	(-)
Number of 99 th pct exceedances	29	0	0	(+)

SOUTHEAST

Since 1873:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	24	1	1	(+)
2-day average	24	1	1	(+)
Avg on non-zero days	24	7	2	(+)
Variability	24	1	0	(+)
Annual max	24	2	0	(+)
Number of 99 th pct exceedances	24	5	0	(+)

Since 1950:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	24	5	0	++
2-day average	24	5	0	++
Avg on non-zero days	24	5	1	++
Variability	24	6	0	++
Annual max	24	4	0	++
Number of 99 th pct exceedances	24	4	0	(+)

Since 1980:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	24	5	0	(+)
2-day average	24	5	0	(+)
Avg on non-zero days	24	5	1	(+)
Variability	24	3	0	(+)
Annual max	24	4	0	(+)
Number of 99 th pct exceedances	24	4	0	(+)

MIDWEST

Since 1893:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	61	23	0	++
2-day average	61	23	0	++
Avg on non-zero days	61	2	12	(+)
Variability	61	12	0	++
Annual max	61	9	0	(+)
Number of 99 th pct exceedances	61	10	0	(+)

Since 1950:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	61	28	2	++
2-day average	61	28	2	++
Avg on non-zero days	61	11	1	++
Variability	61	16	0	(+)
Annual max	61	8	0	(+)
Number of 99 th pct exceedances	61	19	0	++

Since 1980:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	61	6	1	(+)
2-day average	61	6	1	(+)
Avg on non-zero days	61	8	2	(+)
Variability	61	5	1	(+)
Annual max	61	0	1	(+)
Number of 99 th pct exceedances	61	5	3	(-)

NORTHEAST

Since 1888:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	27	12	0	++
2-day average	27	12	0	++
Avg on non-zero days	27	7	1	(+)
Variability	27	4	0	(+)
Annual max	27	3	0	(-)
Number of 99 th pct exceedances	27	5	0	(+)

Since 1950:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	27	12	0	++
2-day average	27	12	0	++
Avg on non-zero days	27	7	1	(+)
Variability	27	4	0	(+)
Annual max	27	3	0	(-)
Number of 99 th pct exceedances	27	5	0	++

Since 1980:

	No. stns	+ trends	- trends	region
1-day average	27	10	1	++
2-day average	27	10	1	++
Avg on non-zero days	27	6	0	(+)
Variability	27	2	0	(+)
Annual max	27	1	0	(+)
Number of 99 th pct exceedances	27	1	1	++

ABOUT THE AUTHORS

[Insert updated bios]

DOCUMENT WITHHELD FOR PRIVILEGE

From: Ross McKittrick [ross.mckittrick@gmail.com]
Sent: 6/28/2025 1:48:32 AM
To: Judith Curry [curry.judith@gmail.com]; Roy W. Spencer [roywspencer@hotmail.com]; John Christy [climateman60@gmail.com]; Steven Koonin [steven.koonin@gmail.com]; Travis Fisher [travis.scott.fisher@gmail.com]; Josh Loucks [loucksj14@gmail.com]; Cohen, Seth [seth.cohen@hq.doe.gov]
Subject: June 27 version of CWG report
Attachments: DoE.Report.ERRATA.FIXED.June27.docx

All errata fixed including Fig 5.7, all metadata listed.
Have a nice weekend everyone.

OUO – Official Use Only



Impacts of Carbon Dioxide Emissions on the U.S. Climate

Climate Working Group
United States Department of Energy
May 27, 2025

OUO – Official Use Only

OUO – Official Use Only

Impacts of Carbon Dioxide Emissions on the U.S. Climate

Report to U.S. Energy Secretary Christopher Wright

May 27, 2025

Climate Working Group:

John Christy, Ph.D.

Judith Curry, Ph.D.

Steven Koonin, Ph.D.

Ross McKittrick, Ph.D.

Roy Spencer, Ph.D.

Copyright © 2025 United States

Suggested citation:

Climate Working Group (2025) Impacts of Carbon Dioxide Emissions on the U.S. Climate. Washington DC: Department of Energy, May 27, 2025.

OUO – Official Use Only

Table of Contents

[TOC\O "1-3" \H \Z \U]

SECRETARY'S FOREWORD

Energy, Integrity, and the Power of Human Potential

Over my lifetime, I've had the privilege of working as an energy entrepreneur across a range of fields—nuclear, geothermal, natural gas, and more—and I now serve as Secretary of Energy under President Donald Trump. But above all, I'm a physical scientist who sees modern energy as nothing short of miraculous. It powers every aspect of modern life, drives every industry, and has made America an energy powerhouse with the ability to fuel global progress.

The rise of human flourishing over the past two centuries is a story worth celebrating. Yet we are told—relentlessly—that the very energy systems that enabled this progress now pose an existential threat. Hydrocarbon-based fuels, the argument goes, must be rapidly abandoned or else we risk planetary ruin.

That view demands scrutiny. That's why I commissioned this report: to encourage a more thoughtful and science-based conversation about climate change and energy. With my technical background, I've reviewed reports from the Intergovernmental Panel on Climate Change, the U.S. government's assessments, and the academic literature. I've also engaged with many climate scientists, including the authors of this report.

What I've found is that media coverage often distorts the science. Many people—even well-meaning ones—walk away with a view of climate change that is exaggerated or incomplete. To provide clarity, I asked a diverse team of independent experts to summarize the current state of climate science, with a focus on how it relates to the United States.

I didn't select these authors because we always agree—far from it. In fact, they may not always agree with each other. But I chose them for their rigor, honesty, and willingness to elevate the debate. I exerted no control over their conclusions. What you'll read are their words, drawn from the best available data and scientific assessments.

I've reviewed the report carefully and challenged its findings. I believe it faithfully represents the state of climate science today. Still, many readers may be surprised by its conclusions—which differ in important ways from the mainstream narrative. That's a sign of how far the public conversation has drifted from the science itself.

To correct course, we need open, respectful, and informed debate. That's why I'm inviting public comment on this report. Honest scrutiny and scientific transparency should be at the heart of our policymaking.

Climate change is real, and it deserves attention. But it is not the greatest threat facing humanity. That distinction belongs to global energy poverty. As someone who values data, I know that improving the human condition depends on expanding access to reliable, affordable energy. Climate change is a challenge—not a catastrophe. But misguided policies based on fear rather than facts could truly endanger human well-being.

We stand at the threshold of a new era of energy leadership. If we empower innovation rather than restrain it, America can lead the world in providing cleaner, more abundant energy—lifting billions out of poverty, strengthening our economy, and improving our environment along the way.

EXECUTIVE SUMMARY

This report reviews scientific certainties and uncertainties in how anthropogenic carbon dioxide (CO₂) emissions have affected, or will affect, the Nation's climate, extreme weather events, and selected metrics of societal well-being. Those emissions are increasing the concentration of CO₂ in the atmosphere through a complex and variable carbon cycle, where some portion of the additional CO₂ persists in the atmosphere for centuries.

Elevated concentrations of CO₂ enhance plant growth, globally “greening” the planet and increasing agricultural productivity. They also make the oceans less alkaline (lower the pH) by an amount within the range of natural variability. That is possibly detrimental to coral reefs, although the recent rebound of the Great Barrier Reef suggests otherwise.

Carbon dioxide also acts as a greenhouse gas, exerting a warming influence on climate and weather. Scenarios of future CO₂ emissions have tended to overestimate observed levels.

The world's several dozen detailed climate models offer little guidance on how the climate responds to elevated CO₂, with the average surface warming under a doubling of the CO₂ concentration ranging from 1.8°C to 5.7°C, a larger range than simpler, data driven estimates, which suggest a response in the range 1.8°C to 2.7°C.

Detailed climate models generally run “hot” in their description of the climate of the past few decades - too much warming at the surface and ~~too much amplification of warming in the lower- and mid-troposphere, in the lower- and mid-troposphere too much amplification of warming aloft.~~ They also produce too much stratospheric cooling, too much snow loss, and too much warming in the Corn Belt. The combination of overly sensitive models and extreme scenarios for future emissions has exaggerated projections of future warming.

Most extreme weather events do not show long-term trends. Claims of increased frequency or intensity of hurricanes, tornadoes, floods, and droughts are not supported by historical data. Additionally, forest management practices are often overlooked in assessing wildfire activity. Global sea level has risen approximately 8 inches since 1900, but there are significant regional variations in tide gauge data driven primarily by local land subsidence; U.S. tide gauge measurements in aggregate show no obvious acceleration in sea level rise beyond the historical average rate.

The attribution of particular climate changes or extreme weather events to human CO₂ emissions is challenged by natural climate variability, data limitations, and inherent model deficiencies. Moreover, solar activity's contribution to the warming climate might be underestimated.

Both models and experience suggest that CO₂-induced warming might be less damaging economically than commonly believed, and excessively aggressive mitigation policies could prove more detrimental than beneficial. Social Cost of Carbon estimates, which attempt to quantify the economic damage of CO₂ emissions, are highly sensitive to their underlying assumptions and so provide limited independent information.

The report supports a more nuanced and evidence-based approach to climate policy. The risks and benefits of a climate changing under both natural and human influences must be weighed against the costs, efficacy, and collateral impacts of any “climate action”, considering the nation's need for reliable and affordable energy with minimal local pollution. Beyond continuing precise, un-interrupted observations of the global climate system, it will be important to make realistic assumptions about future emissions, re-evaluate climate models to address biases and uncertainties, and clearly acknowledge the limitations of ~~extreme~~ event attribution studies. An approach that acknowledges both the potential risks and benefits of

OUO – Official Use Only

CO₂, rather than relying on flawed models and extreme scenarios, is essential for informed and effective decision-making.

PREFACE

This document originated in late March 2025 when Secretary Wright assembled an independent group to write a report on issues in climate science relevant for energy policymaking, with particular focus on the question of whether carbon dioxide emissions endanger the U.S. public. We agreed to undertake the work on the condition that there would be no editorial oversight by the Secretary, the Department of Energy, or any other government personnel. This condition has been honored throughout the process and the writing team has worked with full independence.

The group began working in early April with a deadline of May 28. The short timeline and the technical nature of the material meant that we could not comprehensively review all topics. While the report is intended to be accessible to non-experts, we have omitted some introductory or explanatory material that can easily be accessed elsewhere. Nor have we attempted to survey entire literatures related to the topics covered. We have focused as much as possible on literature published since 2020 and referenced previous IPCC and NCA assessment reports. We have also used data through 2024 where possible.

The writing team is grateful to Secretary Wright for the opportunity to prepare this report and for his support of independent scientific assessment and open scientific debate.

John Christy, Ph.D.

Judith Curry, Ph.D.

Steven Koonin, Ph.D.

Ross McKittrick, Ph.D.

Roy Spencer, Ph.D.

OUO – Official Use Only

**PART I: DIRECT HUMAN INFLUENCE ON ECOSYSTEMS AND THE
CLIMATE**

1 CARBON DIOXIDE AS A POLLUTANT

Chapter summary:

Carbon dioxide (CO₂) differs in many ways from the so-called Criteria Air Pollutants. It does not affect local air quality and has no human toxicological implications at ambient levels. It is an issue of concern because of its potential effects on the global climate, a complex issue that occupies much of this report.

The Clean Air Act of 1970 defined six so-called Criteria Air Contaminants subject to regulation (EPA): particulate matter, ground-level ozone, sulfur dioxide, nitrogen dioxide, lead, and carbon monoxide. In 2007, the Supreme Court ruled that greenhouse gases (CO₂ among them) were also “pollutants” subject to regulation under Clean Air Act (*Mass. v. EPA*, 2007). While the definition of “pollutant” is ultimately a legal one, there are important scientific distinctions between CO₂ and the Criteria Air Contaminants. The latter are subject to regulatory control because they cause local problems depending on concentrations that include nuisances (odor, visibility), damage to plants, and, at high enough exposure levels, toxicological effects in humans. In contrast, CO₂ is odorless, does not affect visibility and has no toxicological effects at ambient levels. It is a naturally occurring part of the atmosphere and a key component of human and plant respiration. CO₂ is essential for plant photosynthesis and higher levels are beneficial for vegetation. In these aspects, CO₂ is similar to water vapor.

Ambient outdoor air today contains about 430 parts per million (ppm) CO₂, increasing at about 2 ppm per year. The U.S. Occupational Safety and Health Administration issues guidelines for indoor workplaces in which elevated CO₂ might be encountered, such as where dry ice is used. The Permissible Exposure Limit is 5,000 ppm over 8 hours (OSHA, 2024). Allen *et al.* (2015) reported evidence of diminished performance on some cognitive tasks among workers in office cubicles when exposed to CO₂ levels above 1,000-1,500 ppm. These levels are far larger than any plausible ambient outdoor value through the end of the 22nd century.

Formatted: Subscript

The growing amount of CO₂ in the atmosphere directly influences the earth system by promoting plant growth (global greening), thereby enhancing agricultural yields, and by neutralizing ocean alkalinity. But the primary concern about CO₂ is its role as a greenhouse gas (GHG) that alters the earth's energy balance. How the climate will respond to that influence is a complex question that will occupy much of this report.

References

- Massachusetts v. Environmental Protection Agency, 549 U.S. 497 (2007). [[HYPERLINK "https://www.oyez.org/cases/2006/05-1120"](https://www.oyez.org/cases/2006/05-1120)]
- U.S. Environmental Protection Agency. (n.d.). Criteria air pollutants. [[HYPERLINK "https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants"](https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants)]
- U.S. Occupational Safety and Health Administration. (2024). OSHA occupational chemical database: Carbon dioxide. [[HYPERLINK "https://www.osha.gov/chemicaldata/183"](https://www.osha.gov/chemicaldata/183)]

2 DIRECT IMPACTS OF CO₂ ON THE ENVIRONMENT

Chapter summary:

CO₂ enhances photosynthesis and improves plant water use efficiency, thereby promoting plant growth. Global greening due to increased CO₂ levels in the atmosphere is well-established on all continents.

CO₂ absorption in sea water makes the oceans less alkaline. The recent decline in pH is within the range of natural variability on millennial time scales. Most ocean life evolved when the oceans were mildly acidic. Decreasing pH might adversely affect corals, although the Australian Great Barrier Reef has shown considerable growth in recent years.

2.1 CO₂ and global greening

The growing CO₂ concentration in the atmosphere has the important positive effect of promoting plant growth by enhancing photosynthesis and improving water use efficiency. That is evident in the “global greening” phenomenon discussed below, as well as in the improving agricultural yields discussed in Chapter 10.

2.1.1 Measurement of global greening

“Greening” refers to an increase in the fraction of the Earth’s surface covered by plants. It can be quantified by the “Leaf Area Index” (LAI) measured by satellite. Many studies over the past decade have confirmed a global greening pattern (increase in LAI) attributable to rising CO₂ levels. Zhu *et al.* (2016) was one of the first studies to report that global greening was detectable using satellite sensors. From 1982 to 2011 they detected greening over 25-50 percent of the Earth versus “browning” over only 4 percent and attributed 70 percent of the greening to rising CO₂ levels (see Figure 2.1).

Zheng (2017) confirmed the pattern, noting that greening over thirty years had added 8 percent to global leaf area and that greening was mitigating warming. Greening has been observed globally but Chen *et al.* (2019) noted that China and India were exploiting it through land management changes. Thus, while China accounts for only 6.6 percent of global vegetated area it accounts for 25 percent of global net increase in LAI. Piao *et al.* (2020) noted that greening was even observable in the Arctic.

While plant models predict increased photosynthesis in response to rising CO₂, Haverd *et al.* (2020) reported a CO₂ fertilization rate nearly double model predictions. That is, CO₂ fertilization had driven an increase in observed global photosynthesis by 30 percent since 1900, versus 17 percent predicted by plant models. This indicates that global models of the socioeconomic impacts of rising CO₂ have likely understated the benefits to crops and agriculture. The connection between CO₂ fertilization and agriculture will be discussed in Chapter 9.

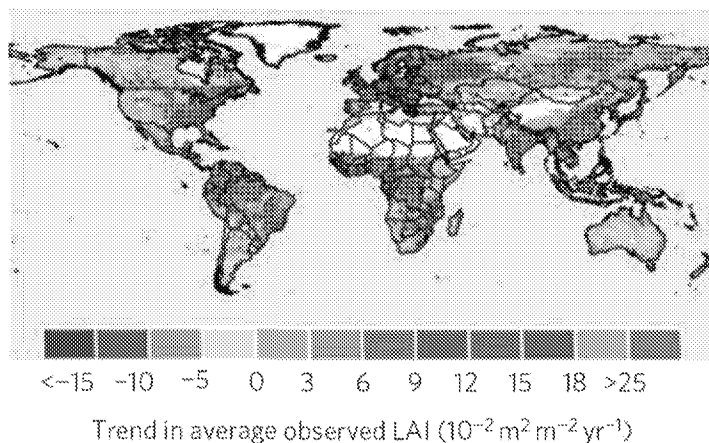


Figure 2.1: Trends in average Leaf Area Index (LAI). Source: Zhu *et al.* 2016 Figure 3.

Finally, Chen *et al.* (2024) surveyed claims that greening had slowed since 2000 due to drought stress. They found instead that faulty satellite sensors were the cause and that the corrected data showed accelerated greening over 55 percent of the globe while browning was accelerating over only 7%. In other words, the greening trend continued with no evidence of slowdown, and CO_2 fertilization remained the dominant driver.

2.1.2 Photosynthesis and CO_2 levels

Plants build biomass through *photosynthesis*, a process that converts carbon dioxide, water, and light into sugar. The plant enzyme responsible for photosynthesis is Ribulose-1,5-bisphosphate-carboxylase/oxygenase or “Rubisco”. Photosynthesis is initiated when CO_2 is available at the surface of the Rubisco enzyme where it is converted to a molecule with 3 carbon atoms and thereafter incorporated into plant mass. This is referred to as the “C3” process.

Rubisco is estimated to have evolved about 3 billion years ago. Over geological time the Earth’s atmospheric CO_2 levels were usually many times higher than they are today, as shown in Figure 2.2.

About 400 million years ago CO_2 levels were an estimated 2,000-4,000 ppm and were at or above 1,000 ppm for much of the interval from 200 to 50 million years ago (Berner 2006, Judd *et al.* 2024). Over the past 35 million years the level of atmospheric CO_2 has been steadily declining, falling to as low as 170 ppm during glaciations (Gerhart and Ward 2010).

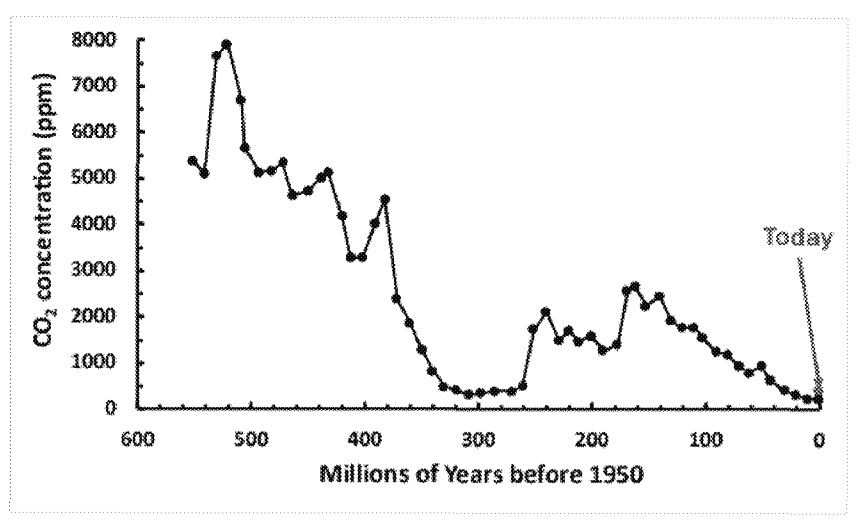


Figure 2.2. Ambient CO₂ levels over the past 550 million years. Today's concentration of 430 ppm is also shown. Source: (Berner 2006)

In response to low-CO₂ conditions some plants evolved another photosynthetic pathway called C4, in which CO₂ is concentrated in the vicinity of Rubisco, allowing for the C3 process to function more efficiently. For agricultural purposes the plant categories are:

- C3: rice, wheat, soybeans and most other crops
- C4: maize (corn), sugar cane, millet, sorghum

Had atmospheric CO₂ levels continued declining, plant growth would have declined and eventually ceased. Below 180 ppm, the growth rates of many C3 species are reduced 40-60 percent relative to 350 ppm (Gerhart and Ward 2010) and growth has stopped altogether under experimental conditions of 60—140 ppm CO₂. Some C4 plants are still able to grow at levels even as low as 10 ppm, albeit very slowly (Gerhart and Ward 2010).

Current CO₂ levels are about 430 ppm, up from 280 ppm in the early 1800s. The positive response of plants to extra CO₂ is illustrated in Figure 2.3, reproduced from Gerhart and Ward (2010). It shows the growth effect of CO₂ on Velvetleaf (*Abutilon theophrasti*) seedlings over 14 days under controlled conditions where only the CO₂ exposure is varied. The gains induced by increasing CO₂ from 150 ppm to 350 ppm continue under a further doubling to 700 ppm.

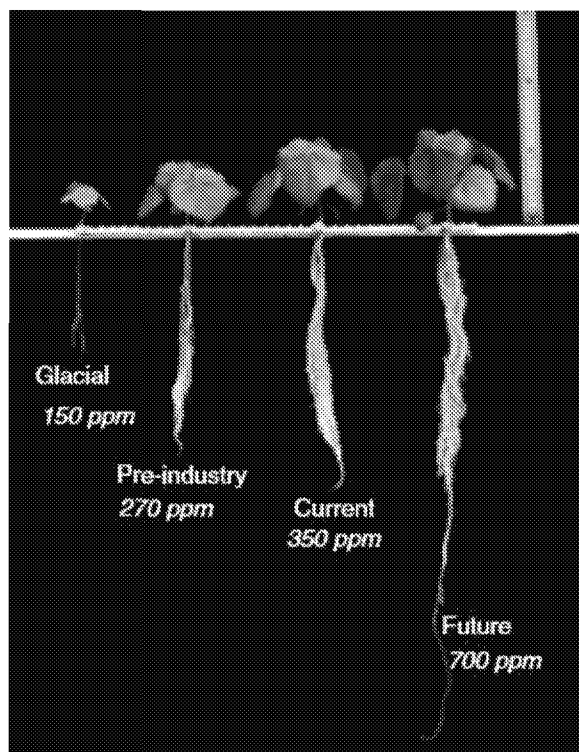


Figure 2.3: growth of *Abutilon theophrasti* after 14 days under identical conditions but for the indicated variations in CO₂ levels. Source: Gerhart and Ward (2010). Note “Current” corresponds to 1988 in image.

Over the past 60+ years there have been thousands of studies on the response of plants to rising CO₂ levels. The overwhelming theme is that plants, especially C3 plants, benefit from extra CO₂. There are two mechanisms by which CO₂ confers a growth benefit:

- Enhanced photosynthesis via the metabolic pathways described above.
- Increased water use efficiency. This arises because plants draw in CO₂ by opening the stomata (pores) on the leaf surface. When CO₂ is scarce the stomata must be kept wide open for long periods, allowing water to evaporate. Under enriched CO₂ conditions the stomata remain closed for longer periods, thus helping the plant retain water longer, and so increasing water use efficiency.

Specific effects of climate change on U.S. agriculture will be reviewed in Chapter 9.

2.1.3 Rising CO₂ and crop water use efficiency

Derying *et al.* (2016) surveyed evidence on crop water productivity (CWP), the yield per unit of water used, drawing attention to the potential for CO₂ both to enhance photosynthesis and to reduce leaf-level transpiration (water loss during leaf respiration). They surveyed all available FACE data (Free Air CO₂

Enrichment—see Chapter 9) on crop yield changes for maize (corn), wheat, rice, and soybean and combined it with crop model data simulating yield responses as of 2080 under the extreme RCP8.5 emissions scenario in four growing regions (Tropics, Arid, Temperate and Cold) each of which were split into rainfed and irrigated sub-regions. They reported that models without CO₂ fertilization predicted CWP losses in every region, but those were more than offset by CO₂ fertilization so that all regions showed a net CWP gain. Deryng *et al.* (2016) also reported that negative impacts of warming on wheat and soybean yields were fully offset by CWP gains and mitigated by up to 90 percent for rice and 60 percent for maize.

Similarly, Cheng *et al.* (2017) noted that increased global plant growth from 1982 to 2011 due to rising CO₂ uptake was accompanied by such large gains in CWP that global water use by plants had not increased, despite the extra biomass.

Deryng *et al.* (2016) assumed that climate change would “exacerbate water scarcity”. Yet while models do predict that drylands will expand under climate warming, current data show the opposite: greening is happening even in arid areas. Zhang *et al.* (2024) report that due to increased CO₂ levels “increasing aridity in drylands won’t lead to a general loss of vegetation productivity”; at most only 4 percent of currently arid areas will see increased desertification.

2.1.4 CO₂ fertilization benefits in IPCC Reports

The IPCC has only minimally discussed global greening and CO₂ fertilization of agricultural crops. The topic is briefly acknowledged in a few places in the body of the IPCC 6th and earlier Assessment Reports but is omitted in all Summary documents. Section 2.3.4.3.3 of the AR6 Working Group I report, entitled “global greening and browning,” points out that the IPCC Special Report on Climate Change and Land had concluded with *high confidence* that greening had increased globally over the past 2-3 decades. It then discusses that there are variations in the greening trend among data sets, concluding that while they have *high confidence* greening has occurred, they have *low confidence* in the magnitude of the trend. There are also brief mentions of CO₂ fertilization effects and improvements in water use efficiency in a few other chapters in the AR6 Working Groups I and II Reports.

Overall, however, the Policymaker Summaries, Technical Summaries, and Synthesis Reports do not discuss the topic.

2.2 The Alkaline Oceans

2.2.1 Changing pH

A neutral aqueous solution has a pH of 7.0, while one with pH greater than 7.0 is alkaline (also termed basic) and with pH less than 7.0 is acidic. The modern-day global average pH of sea water is estimated to be 8.04 (Copernicus Marine Service 2025), down from an estimated value of 8.2 in pre-Industrial times (Gattuso and Hansson, 2011). As CO₂ concentrations in the atmosphere increased, the oceans absorbed more, which decreases their pH. Depending upon the oceans’ buffering capacity, they are expected to become somewhat less alkaline over time, consistent with the observed decrease in pH.

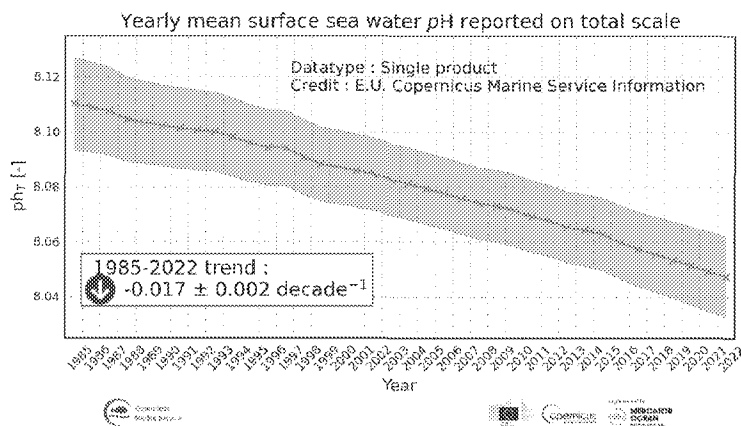


Figure 2.4: Ocean pH 1985 – 2022. Source: Copernicus Marine Service 2025

While this process is often called “ocean acidification”, it is a misnomer because the oceans are not expected to become acidic; “ocean neutralization” would be more accurate. Even if the water were to turn acidic, it is believed that life in the oceans evolved when the oceans were mildly acidic with pH 6.5 - to 7.0 (Krissansen-Totton *et al.*, 2018). On the time scale of thousands of years, boron isotope proxy measurements show that ocean pH was around 7.4 or 7.5 during the last glaciation (up to about 20,000 years ago) increasing to present-day values as the world warmed during deglaciation (Rae *et al.*, 2018). Thus, ocean biota appear to be resilient to natural long-term changes in ocean pH since marine organisms were exposed to wide ranges in pH.

2.2.2 Coral reef changes

There are concerns that a decreasing pH of sea water will reduce the calcification rate of coral reefs. But coral reefs already endure large swings in pH, partly due to daily photosynthetic activity in the reef; measured pH values range from 9.4 during the day to 7.5 at night (Revelle and Fairbridge, 1957). De'ath *et al.* (2009) reported that a portion of Australia's Great Barrier Reef (GBR, the world's largest coral reef ecosystem) had experienced a 14 percent decline in calcification since 1990. This was tentatively attributed to increasing water temperature and decreasing pH. But Ridd *et al.* (2013) showed that report to have resulted from a biased data analysis that, when corrected, showed no change in calcification rates. Nevertheless, the alarm produced by the original paper has persisted as evidenced by the large number of published citations (541) to the original study compared to only 11 citations to the correction (as of 30 April 2025).

The most recent annual summary of GBR conditions from the Australian Institute of Marine Science indicates that coral production has rebounded strongly (AIMS, 2023). Figure 2.5 shows the results of the AIMS surveys of hard coral cover, expressed as a percentage of the reef area. Much of the decline in the GBR before 2011 turned out to be due to intense tropical cyclone activity (Beeden *et al.*, 2015) as well as a string of marine heatwaves, agricultural runoff and invasive species (Woods Hole, 2023). Given the reported declines in GBR calcification between 1990 and 2009 and the continued increase in atmospheric CO₂ levels the rebound has surprised some observers.

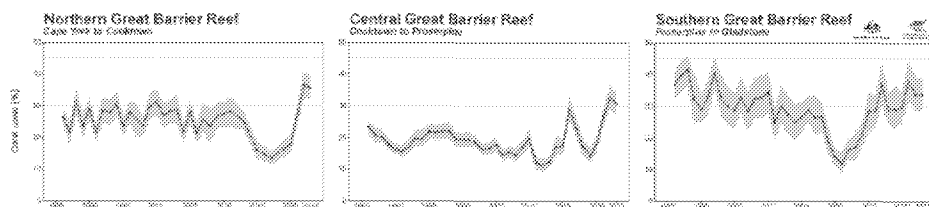


Figure 2.5 Hard coral cover of three regions of the Great Barrier Reef 1985 to 2023. Source: AIMS 2023.

It is being increasingly recognized that publication bias (alarming ocean acidification results preferred by high-impact research publications) exaggerates the reported impacts of declining ocean pH. An ICES Journal of Marine Science Special Issue addressed this problem with an article entitled, *Towards a Broader Perspective on Ocean Acidification Research*. In the Introduction to that Special Issue, H. I. Browman stated, “As is true across all of science, studies that report no effect of ocean acidification are typically more difficult to publish.” (Browman, 2016).

Similarly, a meta-analysis (Clements *et al.*, 2021) of the negative effects of ocean acidification on reef fish behavior found what they called a “decline effect”: initially dramatic conclusions published in prominent journals showing apparently large impacts of acidification tended to be followed up by subsequent studies on larger sample sizes yielding much smaller and typically non-existent effects. They call for their colleagues to improve research practices to counter the “decline effect”:

[The] vast majority of studies with large effect sizes in this field tend to be characterized by low sample sizes, yet are published in high-impact journals and have a disproportionate influence on the field in terms of citations. We contend that ocean acidification has a negligible direct impact on fish behavior, and we advocate for improved approaches to minimize the potential for a decline effect in future avenues of research (Clements *et al.*, 2021).

In summary, ocean life is complex and much of it evolved when the oceans were acidic relative to the present. The ancestors of modern coral first appeared about 245 million ago; as can be seen from Figure 2.2, CO₂ levels for more than 200 million years afterward were many times higher than they are today. Much of the public discussion of the effects of ocean “acidification” on marine biota has been one-sided and exaggerated. There is a known tendency for studies reporting dramatic effects on things like coral cover and fish behavior to get published in high-impact journals and receive widespread press coverage, then subsequent research rebutting those findings receives little attention.

References

- AR6: *Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report* (2021) Working Group I Contribution. [HYPERLINK "<http://www.ipcc.ch>"].
- Australian Institute of Marine Science. (2022). Continued coral recovery leads to 36-year highs across two-thirds of the Great Barrier Reef. [HYPERLINK "https://www.aims.gov.au/sites/default/files/2022-08/AIMS_LTMP_Report_on%20GBR_coral_status_2021_2022_040822F3.pdf"]

- Beeden, R., Maynard, J., Puotinen, M., Marshall, P., Dryden, J., Goldberg, J., and Williams, G. (2015). Impacts and recovery from Severe Tropical Cyclone Yasi on the Great Barrier Reef. *PLOS ONE*, 10, e0121272. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121272>"]
- Berner, R. A. (2006). GEOCARBSULF: A combined model for Phanerozoic atmospheric O₂ and CO₂. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 5653–5664.
- Browman, H. I. (2016). Applying organized scepticism to ocean acidification research. *ICES Journal of Marine Science*, 73(3), 529.1–536. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw010>"]
- Chen, C., Park, T., Wang, X., Piao, S., Xu, B., Chaturvedi, R. K., and Myneni, R. B. (2019). China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2, 122–129. [HYPERLINK "<https://www.nature.com/articles/s41893-019-0220-7>"]
- Chen, X., Wang, Y., Liu, Y., and Piao, S. (2024). The global greening continues despite increased drought stress since 2000. *Global Ecology and Conservation*, 49, e02791. [HYPERLINK "<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351989423004262>"]
- Cheng, L., Zhang, L., Wang, Y. P., *et al.* (2017). Recent increases in terrestrial carbon uptake at little cost to the water cycle. *Nature Communications*, 8, 110. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1038/s41467-017-00114-5>"]
- Clements, J. C., Sundin, J., Clark, T. D., and Jutfelt, F. (2022). Meta-analysis reveals an extreme “decline effect” in the impacts of ocean acidification on fish behavior. *PLOS Biology*, 20(2), e3001511. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001511>"]
- Copernicus Marine Service. (2025). Global ocean acidification – Mean sea water pH time series and trend from multi-observations reprocessing. [HYPERLINK "https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_OMI_HEALTH_carbon_ph_area_averaged/description"]
- De'ath, G., Lough, J., and Fabricius, K. (2009). Declining coral calcification on the Great Barrier Reef. *Science*, 323, 116–119. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1126/science.1165283>"]
- Deryng, D., Conway, D., Ramankutty, N., Price, J., Warren, R., Jones, R., ... and Elliott, J. (2016). Regional disparities in the beneficial effects of rising CO₂ concentrations on crop water productivity. *Nature Climate Change*. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1038/nclimate2995>"]
- Gattuso, J. P., and Hansson, L. (Eds.). (2011). *Ocean acidification: Background and history*. Oxford University Press.
- Gerhart, L. M., and Ward, J. K. (2010). Plant responses to low [CO₂] of the past. *New Phytologist*, 188, 674–695. [HYPERLINK "<https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1469-8137.2010.03441.x>"]
- Haverd, V., Raupach, M., Briggs, P., *et al.* (2020). Higher than expected CO₂ fertilization inferred from leaf to global observations. *Global Change Biology*, 26, 2390–2402.
- Judd, E. J., Scotese, C. R., Young, S. A., *et al.* (2024). A 485-million-year history of Earth's surface temperature. *Science*, 385(6715). [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1126/science.adk3705>"]
- Krissansen-Totton, J., Arney, G. N., and Catling, D. C. (2018). Constraining the climate and ocean pH of the early Earth with a geological carbon cycle model. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(6), 4105–4110. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1073/pnas.1721296115>"]
- Piao, S., Wang, X., Park, T., *et al.* (2020). Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth and Environment*, 1, 14–27.
- Rae, J. W. B., Burke, A., Robinson, L. F., *et al.* (2018). CO₂ storage and release in the deep Southern Ocean on millennial to centennial timescales. *Nature*, 562, 569–573. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0614-0>"]
- Ravelle, R., and Fairbridge, R. W. (1957). Carbonate and carbon dioxide. In J. W. Hedgpeth (Ed.), *Treatise on marine ecology and paleoecology* (Vol. 1). *Geological Society of America*.
- Ridd, P., Silva, E., and Stieglitz, T. (2013). Have coral calcification rates slowed in the last twenty years? *Marine Geology*, 346, 392–399. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.09.002>"]

OUO – Official Use Only

- Woods Hole Oceanographic Institution. (2023). Is the Great Barrier Reef making a comeback? [HYPERLINK "<https://www.whoi.edu/oceanus/feature/is-the-great-barrier-reef-making-a-comeback/>"]
- Zhang, Y., Liu, Y., Chen, X., *et al.* (2024). Less than 4% of dryland areas are projected to desertify despite increased aridity under climate change. *Nature Communications Earth and Environment*, 5. [HYPERLINK "<https://www.nature.com/articles/s43247-024-01463-y>"]
- Zhu, Z., Piao, S., Myneni, R. B., *et al.* (2016). Greening of the Earth and its drivers. *Nature Climate Change*, 6, 791–795. [HYPERLINK "<https://www.nature.com/articles/nclimate3004>"]

3 HUMAN INFLUENCES ON THE CLIMATE

Chapter Summary:

The global climate is naturally variable on all time scales. Anthropogenic CO₂ emissions add to that variability by changing the total radiative energy balance in the atmosphere.

The IPCC has downplayed the role of the sun in climate change but there are plausible solar irradiance reconstructions that imply it contributed to recent warming.

Climate projections are based on IPCC emission scenarios that have tended to exceed observed trends. Most academic climate impact studies in recent years are based upon the extreme RCP 8.5 scenario that is now considered implausible; its use as a business-as-usual scenario has been misleading.

Carbon cycle models connect annual emissions to growth in the atmospheric CO₂ stock. While models disagree over the rate of land and ocean CO₂ uptake, all agree that it has been increasing since 1959.

3.1 Components of radiative forcing and their history

3.1.1 Historical radiative forcing

A changing climate has been the norm throughout the Earth's 4.6-billion-year history. The Earth's temperature and weather patterns change naturally over timescales ranging from decades to millions of years. Natural variations in the surface climate originate in two ways. Internal climate fluctuations associated with circulations in the atmosphere and ocean exchange energy, water, and carbon between the atmosphere, oceans, land, and ice. External influences on the climate system include variations in the energy received from the sun and the effects of volcanic eruptions. Human activities influence climate through changing land use and land cover. Humans are also changing the composition of the atmosphere by emissions of CO₂ and other greenhouse gases and by altering the concentration of aerosol particles in the atmosphere.

The earth is warmed by the sunlight it absorbs and is cooled by the heat it radiates to space. Averaged over the Earth's surface, each of these processes involve power flows of about 240 Watts per square meter (W/m²). When they are in balance, there are no net external causes of warming or cooling. Both human and natural influences on the climate alter this balance and so cause the climate to change.

Influences on the Earth's energy balance at the top of the atmosphere are quantified by "radiative forcing", the extent to which they disturb the warming/cooling balance; a positive forcing warms while a negative forcing cools. The IPCC's estimated history of major components of radiative forcing since 1750 is shown in the following two figures from its AR6.

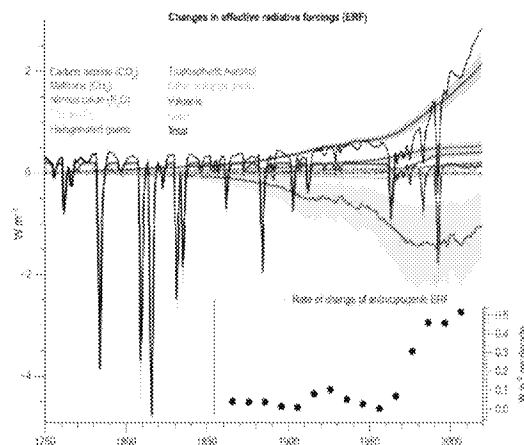


Figure 3.1.1: IPCC estimates of radiative forcing components over time. Shading indicates uncertainty ranges. Source: AR6 WGI Ch2 Fig. 10

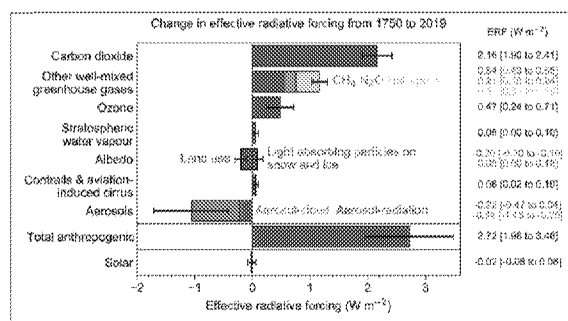


Figure 3.1.2 IPCC estimates of radiative forcing component changes from 1750 to 2019. Source: AR6 WGI Ch 7 Fig. 7-6.

These graphs show that the total radiative forcing is comprised of both natural and anthropogenic components. Carbon dioxide is the largest human influence on the climate and the one most relevant to the influence of fossil fuel use. It exerts a warming influence by decreasing the cooling power of the atmosphere. Emissions of CO₂ are accumulating in the atmosphere, as described in the following section, so that the warming influence is growing. Other greenhouse gases (methane, nitrous oxide, halogens, and ozone) act similarly, currently adding another 75 percent to CO₂'s warming. Aerosols exert an overall cooling effect, although with large uncertainties in the way they catalyze the formation of reflective clouds. As a result, understanding the causes of recent warming requires not just identifying the warming effects of CO₂, but also the more uncertain cooling effects of aerosols.

The IPCC assesses the change in the radiative forcing by the sun to be negligible, based on their preference for data reconstructions that imply minimal solar change since preindustrial times. But Connolly *et al.* (2021) reviewed sixteen different Total Solar Irradiance (TSI) reconstructions in the literature

covering the years 1600-2000; the reconstructions vary from almost no change in TSI to a relatively large upward trend. Those authors note that the variation in TSI reconstructions combined with variations in surface temperature reconstructions allows for inferences consistent with either no or most 20th Century century warming being attributable to the sun.

A particularly thorny issue is the gap in TSI data between 1989 and 1991 due to a delay in the launch of a monitor following the Space Shuttle Challenger disaster on January 28 1986. This delay prevented a replacement satellite from being launched in time to overlap with, and its readings to be intercalibrated with, the prior system (Zacharias 2014, Scafetta *et al.* 2019). This is called the ACRIM (Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor) gap problem. The question of whether there is an upward trend in TSI over 1978 to 2018 hangs on how the ACRIM data gap is filled. Connolly *et al.* (2021) found that the IPCC's consensus statements on solar forcing were formulated prematurely through the suppression of dissenting scientific opinions.

Another natural radiative forcing component is volcanic aerosols, which exert an episodic cooling influence. Box 4.1 in the IPCC AR6 Report addresses the climate impact of volcanic eruptions, noting three explosive volcanic eruptions that occurred in the first half of the 19th century. This included the 1815 Tambora eruption that resulted in the 'year without summer', with multiple harvest failures across the Northern Hemisphere. There is uncertainty about the sign of the relatively small forcing due to the submarine volcano Hunga Tonga which erupted in 2022 (Jenkins *et al.* 2023, Schoeberl *et al.* 2024).

Figure 3.1.1 shows that the anthropogenic forcing component was negligible before about 1900 and has increased steadily since, rising to almost 3 W/m² today. However, this is still only about 1 percent of the unperturbed radiation flows, making it a challenge to isolate the effects of anthropogenic forcing; state-of-the-art satellite estimates of global radiative energy flows are only accurate to a few W/m².

Natural sources of global energy imbalance other than volcanoes and total solar irradiance (TSI) are not included in these graphs because they remain largely unknown.

3.1.2 Change in atmospheric CO₂ since 1958

Carbon dioxide's warming influence depends on how much "extra" CO₂ accumulates in the atmosphere- *i.e.*, its concentration above the preindustrial value of 280 ppm. The CO₂ level as recorded at the Mauna Loa observatory in Hawaii, generally used as the representative global average concentration, is available online at [HYPERLINK "<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/index.html>"]. The concentration was about 316 ppm at the start of the record in 1959 and is now about 430 ppm, a 36 percent increase. At the end of the last glaciation CO₂ levels had fallen to about 180 ppm. As discussed in Chapter 2, C3 plants begin dying at CO₂ levels below about 140 ppm and C4 plants at levels below 100 ppm, so if CO₂ levels had continued falling plant life would have been imperiled.

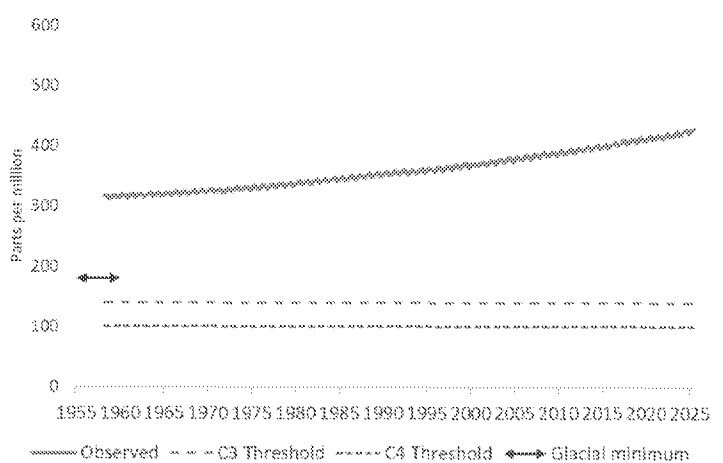


Fig. 3.1.3. Yearly average atmospheric CO₂ concentrations(1959-2025) in ppm measured at Mauna Loa (blue). C3 Threshold: Level below which C3 plants begin dying (140 ppm, see Chapter 2). C4 Threshold: Level below which C4 plants begin dying (100 ppm, see Chapter 2). Glacial minimum: Minimum level during recent glaciations (purple arrow). CO₂ data source: [[HYPERLINK "https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/index.html"](https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/index.html)]

The annual increase in concentration is only about half of the CO₂ emitted because land and ocean processes currently absorb “excess” CO₂ at a rate approximately 50 percent of the human emissions. Future concentrations, and hence future human influences on the climate, therefore depend upon two components (1) future rates of global human CO₂ emissions, and (2) how fast the land and ocean remove extra CO₂ from the atmosphere. We discuss each of these in turn.

3.2 Future emission scenarios and the carbon cycle

3.2.1 Emission scenarios

Assessing the dangers of future GHG emissions requires assumptions about what those emissions will be. Future emissions, and hence human influences on the climate, will depend upon future demographics, economic activity, regulation, and energy and agricultural technologies. Various assumptions about each of those lead to projections of greenhouse gas emissions and concentrations, aerosol concentrations, and changes in land use, which ultimately can be combined into assumptions about anthropogenic radiative forcing.

The great uncertainties about these many factors make it impossible to precisely predict future emissions. Instead, the IPCC has created various sets of scenarios meant to span a plausible range of possibilities for population, economy, and technologies. Recent versions of the scenarios are labeled by a number indicating the anthropogenic radiative forcing expected in 2100 under that scenario. Thus, a scenario labeled with a “6” corresponds to 6 W/m² of human-induced radiative forcing (warming) at the end of the century. (Recall current anthropogenic radiative forcing is about 2.7 W/m².)

Although the IPCC does not claim its emission scenarios are forecasts, they are often treated as such. Comparisons of past scenario groups against observations show that IPCC emission projections tend to overstate actual subsequent emissions. For the IPCC Third and Fourth Assessment Reports a set of emission projections from the *Special Report on Emission Scenarios* was used; these were referred to as the SRES scenarios. McKittrick *et al.* (2012) showed that, when converted to per capita values, the SRES scenario emissions distribution was skewed upwards and incompatible with observed trends. McKittrick and Wood (2013) further showed that global energy market dynamics constrained global per capita CO₂ emissions to an extent not reflected in IPCC scenarios. The bias of the SRES scenarios was confirmed by the later analysis of Hausfather *et al.* (2019) who showed that observed atmospheric CO₂ concentrations tracked the low end of the SRES range and also of subsequent IPCC scenario ranges (Figure 3.2.1).

For AR5 the IPCC developed a new set of scenarios called the Representative Concentration Pathways (RCPs). These were identified by a number representing the increase in forcing and were thus called RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 and RCP8.5. RCP2.6 (implying an anthropogenic radiative forcing in 2100 of 2.6 W/m²) describes a GHG concentration pathway leading to warming well below 2°C. At the other end of the scale RCP8.5 is an extreme outcome implying nearly 5°C warming from 1900 to 2100.

RCP8.5 came to be referred to as the no-policy baseline, or “business-as-usual” scenario in both the academic literature and popular media. It was therefore used to generate the reference outcome supposedly representing the 21st century world in the absence of increasingly stringent emission reduction policies. But RCP8.5 was intended as a low-probability high emissions scenario and its use as a business-as-usual baseline has been criticized as grossly misleading.¹ Hausfather and Peters (2020) writing in a commentary in *Nature* magazine, pointed out that RCP8.5 was developed as an extreme worst-case, and its misuse as a “business as usual” baseline has resulted in a large number of misleading studies and media reporting.

The implausibility of the RCP8.5 scenario was examined by Burgess *et al.* (2021). They noted that RCP8.5 has already diverged from observed trends in energy use and the near future trends diverge sharply from those of the International Energy Agency (IEA), which provides market-based projections of energy use for the coming decades. The IEA trends, which are based on plausible extrapolations of current economic and demographic trends, run below the entire envelope of RCP projections, implying not only that RCP8.5 is dubious, but that even lower emission scenarios are looking unlikely.

Formatted: Not Strikethrough

Widespread use of RCP8.5 has created an alarmist bias in the climate impacts literature. The extent of this problem was confirmed in a literature analysis by Pielke Jr. and Ritchie (2020). They found that some 16,800 scientific papers published between 2010 and 2020 used the RCP8.5 scenario, with about 4,500 of the articles linking RCP8.5 to the concept of “business-as-usual”. Their analysis showed how RCP8.5 was misused not only by individual researchers, but also by influential science agencies like the IPCC and the U.S. National Climate Assessment (USNCA), which has directly led to misleading coverage in prominent media outlets.

¹ This extreme scenario is useful for modelers, since a large forcing generates a large response (warming) making it easier to assess a model’s sensitivity. But that’s very different than claiming it is a plausible future outcome.

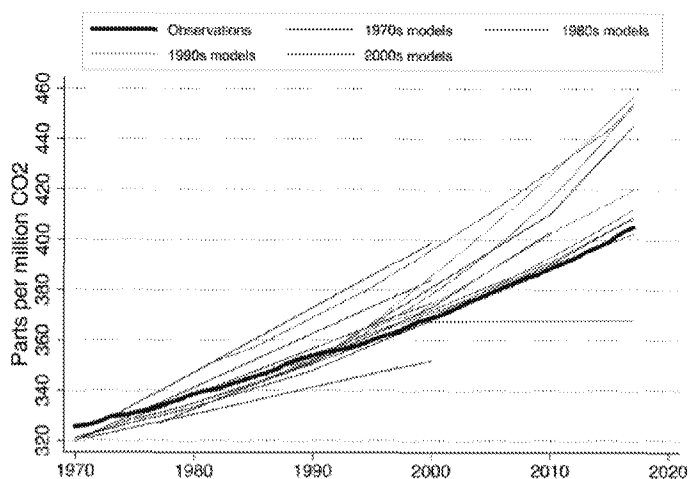


Figure 3.2.1 Comparison of observed atmospheric CO₂ levels (black line) with scenario projections (colored lines, mainly IPCC) since the 1970s. Source: Hausfather *et al.* (2019) Figure S4.

Pielke and Ritchie (2020) reported new studies using RCP8.5 were published at a rate of about 20 per day, with about two per day specifically linking RCP8.5 and “business as usual.” They conclude that the climate research community has spent a decade “committing scientific resources to science fiction” and that “The scientific literature has become imbalanced in an apocalyptic direction.”

The IPCC developed a new set of scenarios for AR6, the “Shared Socioeconomic Pathway” (SSP) scenarios, which have continued the bias shown in the RCP and SRES scenarios. Figure 3.2.2 shows total global observed CO₂ emissions compiled by the International Energy Agency (IEA) merged with the emission projection from the IEA taking account of energy use projections and current policies. The other lines show the range of IPCC SSP scenarios (SSP1-SSP5). As of 2023, global CO₂ emissions have been tracking well below SSP7.0 and are even below SSP2-4.5.

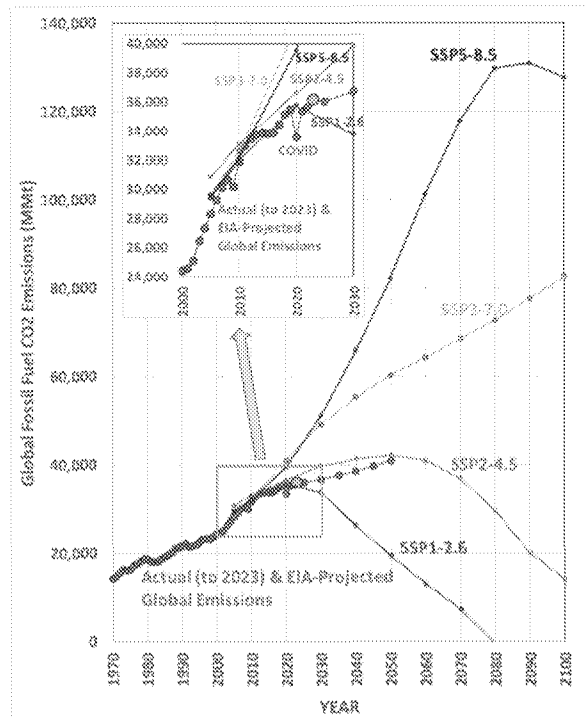


Figure 3.2.2. Observed and projected CO₂ emissions. Source: IPCC (SSP scenarios) and Energy Information Administration (EIA). Green: observed historical emissions and EIA projections. Other lines: SSP1-5. Data source: Friedlingstein *et al.* (2024).

3.2.2 The carbon cycle relating emissions and concentrations

Carbon dioxide emissions from fossil fuel burning (and to a lesser extent deforestation and cement production) have led to steadily increasing CO₂ concentrations in the atmosphere, as shown in Fig. 3.1.3. The relation between emissions and concentration is determined by the global carbon cycle of land and ocean processes that exchange carbon with the atmosphere. Our understanding of these processes was reviewed by Crisp *et al.* (2021).

There are about 850 Gt of carbon (GtC) in the Earth's atmosphere², almost all of it in the form of CO₂. Each year, biological processes (plant growth and decay) and physical processes (ocean absorption and outgassing) exchange about 200 GtC of that carbon with the Earth's surface (roughly 80 GtC with the land and 120 GtC with the oceans). Before human activities became significant, removals from the atmosphere were roughly in balance with additions. But burning fossil fuels (coal, oil, and gas) ~~takes~~ removes carbon ~~out of~~ from the ground and adds it to the annual exchange with the atmosphere. That addition (together with

² Because CO₂ is chemically transformed through the course of the carbon cycle, it is more convenient to track atoms of carbon rather than molecules of CO₂. One gigatonne of carbon (GtC) is equivalent to about 3.7 Gt of CO₂.

a much smaller contribution from cement manufacturing) amounted to 10.3 GtC in 2023, or only about 5 percent of the annual exchange with the atmosphere.

The carbon cycle accommodates about 50 percent of humanity's small annual injection of carbon into the air by naturally sequestering it through plant growth and oceanic uptake, while the remainder accumulates in the atmosphere (Ciais *et al.*, 2013). For that reason, the annual increase in atmospheric CO₂ concentration averages only about half of that naively expected from human emissions.

To project future CO₂ concentrations in the atmosphere, and hence future human influences on the climate, it is important to know how the carbon cycle might change in the future. The historical near constancy of that 50 percent fraction means that the more CO₂ humanity has produced, the faster ~~Nature~~ nature removed it from the atmosphere. That 50 percent fraction changes somewhat from year to year due to natural carbon cycle imbalances from El Niño, La Niña, and varying weather patterns. There was also a substantial additional reduction in atmospheric CO₂ after the 1991 eruption of Mt. Pinatubo, a curious result that has yet to be explained (Angert *et al.*, 2004).

The main processes that remove excess CO₂ from the atmosphere are increased growth of land vegetation (especially at high latitudes), some increase in the sequestering of carbon in soils, and uptake of CO₂ by the ocean due to the increasing partial pressure of atmospheric CO₂ over that of CO₂ dissolved in the ocean. All twenty land carbon cycle models tracked by the Global Carbon Project (Friedlingstein *et al.*, 2024) show land processes have been removing excess CO₂ at an increasing rate since 1959. This is consistent with a “global greening” phenomenon (Chapter 2.1) observed by satellites since monitoring of global greenness began in 1982.

While land vegetation has been responding positively to more atmospheric CO₂, uptake of extra CO₂ by ocean biological processes remains too uncertain to be measured reliably. Our current understanding of these and many more carbon cycle processes was reviewed by Crisp *et al.* (2021).

CO₂ uptake by land processes

The uptake of extra CO₂ from the atmosphere by land surface processes (as also inferred from global greening) has been modeled with 20 different dynamic global vegetation models, the outputs of which are updated every year by the Global Carbon Project (Friedlingstein, 2024). As seen in Fig. 3.2.3, all of those models agree that vegetation and soils have been sequestering carbon from the atmosphere. But we also see that the long-term trends over 1959 to 2023 (65 years) vary widely between models, by nearly a factor of 7. This demonstrates that there remains considerable uncertainty in how fast land processes are removing CO₂ from the atmosphere, which in turn creates uncertainty in future atmospheric CO₂ concentrations, ~~which are then and then produce~~ which then produce uncertainty in climate model simulations of future climate change.

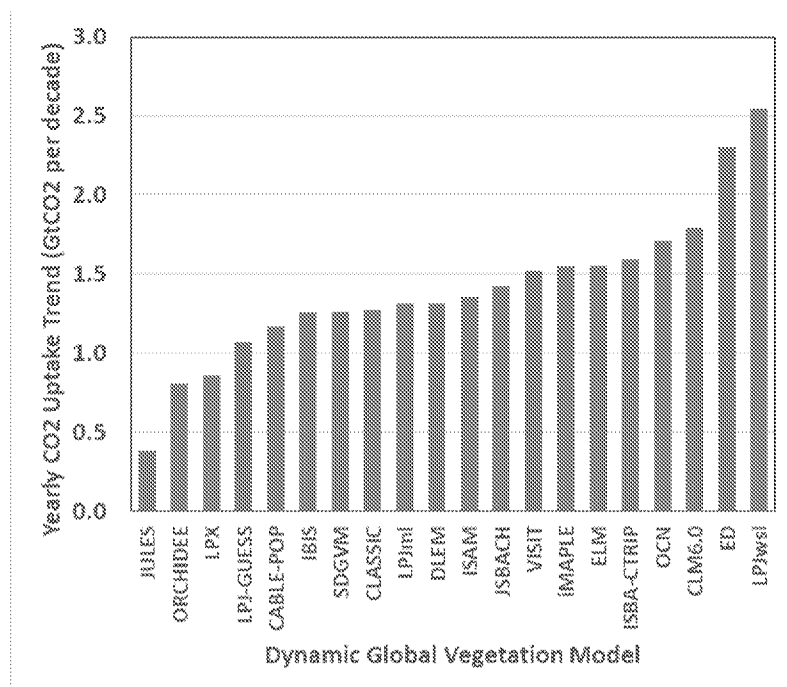


Figure 3.2.3 Trends of annual CO₂ uptake (GtCO₂ per year per decade) by land processes during 1959-2023 simulated by 20 different dynamic global vegetation models periodically reported by the Global Carbon Project (Friedlingstein, 2024).

CO₂ uptake by ocean processes

The uptake of extra CO₂ from the atmosphere by ocean processes has been modeled with 10 different ocean biogeochemistry models, the outputs of which are updated every year by the Global Carbon Project (Friedlingstein, 2024). Like the results from the land models, all of the ocean models agree that the global oceans have been sequestering carbon from the atmosphere at an increasing rate during 1959-2023 (Fig. 3.2.4). Unlike the land models, however, the ocean models show much better agreement with each other, with the model producing the fastest increasing CO₂ uptake being only 65 percent faster than the model with the most slowly increasing CO₂ uptake. In spite of the relative agreement among models, Friedlingstein *et al.* (2022) notes that there is also substantial discrepancy between the different methods on the strength of the ocean sink over the last decade, particularly in the Southern Ocean.

Note that the average trend in CO₂ uptake across all land models in Fig. 3.2.3 is 25 percent larger than the average trend in ocean uptake. This suggests land processes are increasing in their ability to remove CO₂ faster than ocean processes are increasing their CO₂ sequestration.

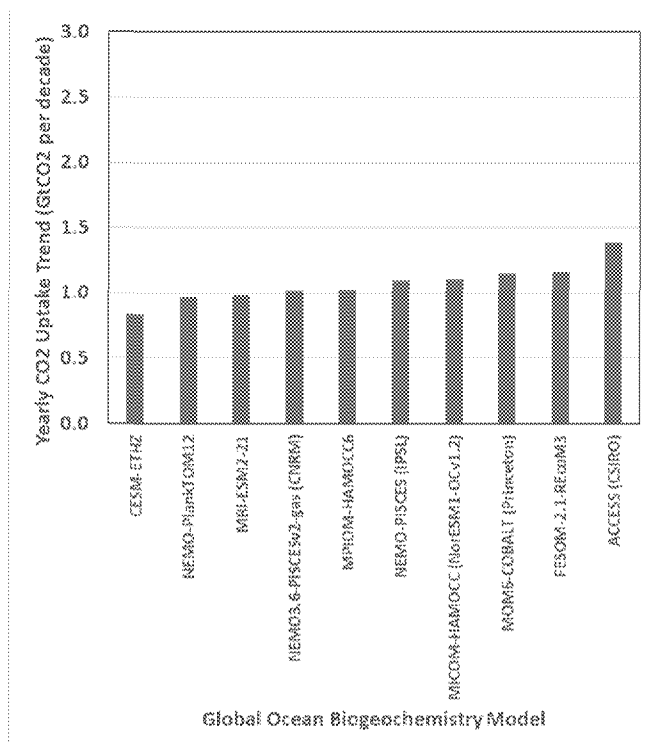


Figure 3.2.4 Trends of annual CO₂ uptake (GtCO₂ per year per decade) by ocean processes during 1959-2023 simulated by 10 different ocean biogeochemistry models periodically reported by the Global Carbon Project (Friedlingstein, 2024).

3.3 Urbanization influence on temperature trends

Historical temperature data over land has been collected mainly where people live. This raises the problem of how to filter out non-climatic warming signals due to Urban Heat Islands (UHI) and other changes to the land surface. If they ~~these~~ are not removed the data may over-attribute observed warming to greenhouse gases. The IPCC acknowledges that raw temperature data are contaminated with UHI effects but claims to have data cleaning procedures that remove them. It is an open question whether those procedures are sufficient.

AR6 downplayed ~~the this~~ issue by saying (WGI p. 235) that no recent evidence had emerged to alter the AR5 finding that urbanization causes an upward bias of no more than 10 percent in the global land surface warming trend. AR5 (WGI p. 189) also cited the 10 percent upper bound without citing a source. AR4 (WGI p. 244) cited Jones *et al.* (1990) and Peterson *et al.* (1999) as the basis of the claim. Peterson *et al.* had failed to find any difference in trends between rural and urban samples, although their definition of rural included local populations up to 10,000 persons while the relative influence of urbanization begins well below that (Spencer *et al.*, 2025). Jones *et al.* compared rural/urban warming in three regions: Eastern Australia, Eastern China and Western Soviet Union. Their definition of “rural” included towns of up to

10,000 in the former Soviet Union and up to 100,000 in China. They found relative warming biases greater than 10 percent in these areas but conjectured that the urbanization effect averaged over the areas they did not examine would bring the global land bias to under 10 percent of the observed warming trend.

Several papers appeared in print prior to the IPCC AR4 that argued that the warming effect of UHIs added a relatively large (30-50%) component to observed warming and was not simulated by climate models (de Laat and Maurellis 2006, McKittrick and Michaels 2007). These findings were based on correlations between locations of maximum warming over land with locations of maximum socioeconomic development. AR4 asserted (p. 244) that these correlations were an artefact of natural atmospheric circulations and were in fact statistically insignificant, and on that basis set the findings aside. Their claim was controversial because it was presented with no supporting evidence. McKittrick (2010) and McKittrick and Nierenberg (2010) showed that taking into account various conjectured alternative explanations for the correlations did not affect their significance. The AR5 (p. 189) conceded that the AR4 had provided “no explicit evidence” for its assessment and further acknowledged, based on these papers, that there was “significant evidence for such contamination of the record” i.e. a warming bias in the land record. However as already noted, elsewhere in the AR5 report they carried forward the AR4 claim that it was less than 10 percent of observed warming. Further they provided no caution about using the land record for climate measurement despite conceding the evidence for UHI contamination. Recently Soon *et al.* (2023) estimated an urbanization bias in the Northern Hemisphere land record over 1850-2018 sufficient to increase the trend in the blended record from 0.55°C to 0.89°C per century.

Some studies providing evidence against UHI contamination compared warming rates between rural and urban locations (Jones *et al.* 1990, Peterson *et al.* 1999, Wickham *et al.* 2013). It is not known whether such methods would be capable of detecting UHI bias even when present. The influence of UHI warming is logarithmic in population, in other words it is strongest at low population density then levels off as local urbanization expands (Oke 1973, Spencer *et al.* 2025). Hence failure to find a difference in warming rates between urban and rural stations does not prove the absence of UHI contamination. McKittrick (2013) provided an empirical demonstration in which the rural/urban trends were not significantly different in a data set shown on other grounds to be contaminated with UHI bias.

Parker (2006) instead examined a sample of urban locations and found no difference in trends between subsets partitioned according to nighttime wind speed, concluding on this basis that urbanization could not be a significant factor. Here again the question is whether such a method would find UHI bias even if present. McKittrick (2013) presented an example in which UHI-contaminated data did not exhibit significant trend differences when stratified according to wind speed.

The challenge in measuring UHI bias is relating local temperature change to a corresponding change in population or urbanization, rather than to a static classification variable such as rural or urban. Spencer *et al.* (2025) used newly available historical population archives to undertake such an analysis and found evidence of significant UHI bias in U.S. summertime temperature data.

In summary, while there is clearly warming in the land record, there is also evidence that it is biased upward by patterns of urbanization and that these biases have not been completely removed by the data processing algorithms used to produce climate data sets.

References

- Angert, A., S. Biraud, Bonfils, C., Buermann, W. and I. Fung (2004). CO2 seasonality indicates origins of post-Pinatubo sink. *Geophysical Research Letters* 31. [[HYPERLINK "https://doi.org/10.1029/2004GL019760" to "_blank"](https://doi.org/10.1029/2004GL019760)]
- AR6: *Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report* (2021) Working Group I Contribution. [[HYPERLINK "http://www.ipcc.ch"](http://www.ipcc.ch)].

- AR5: *Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report* (2011) Working Group I Contribution. [HYPERLINK "<http://www.ipcc.ch>"].
- AR4: *Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report* (2011) Working Group I Contribution. [HYPERLINK "<http://www.ipcc.ch>"].
- Burgess, Matthew et al (2021) *Environmental Research Letters* 16 014016 [HYPERLINK "<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abedd2/meta>"]
- Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, et al. (2013): Carbon and Other Biogeochemical Cycles In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Connolly, Roman, Willie Soon, Michael Connolly et al. (2021) How much has the Sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate *Research in Astronomy and Astrophysics* 21(6) doi: 10.1088/1674-4527/21/6/131 [HYPERLINK "<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4527/21/6/131>"]
- Crisp, David & Dolman, Han (A.J.) & Tanhua, Toste & McKinley, Galen & Hauck, Judith & Bastos, Ana & Sitch, Stephen & Eggleston, Simon & Aich, Valentin. (2022). How Well Do We Understand the Land-Ocean-Atmosphere Carbon Cycle?. *Reviews of Geophysics*. 60. 10.1029/2021RG000736.
- De Laat, A.T.J., and A.N. Maurellis (2006), Evidence for influence of anthropogenic surface processes on lower tropospheric and surface temperature trends, *International Journal of Climatology* 26:897—913.
- Friedlingstein, P., and 95 co-authors (2024): Global Carbon Budget 2024, *Earth System Science Data* 14(4), [HYPERLINK "<https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2024-519>"]
- Hausfather et al. (2019) “Evaluating the Performance of Past Climate Model Projections” *Geophysical Research Letters* 47(1) [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1029/2019GL085378>"]
- Hausfather, Z. and G. Peters (2020) “Emissions – the ‘business as usual’ story is misleading” *Nature* 29 January 2020 [HYPERLINK "<https://www.nature.com/articles/d41586-020-00177-3>"]
- Jenkins, S., Smith, C., Allen, M. et al. Tonga eruption increases chance of temporary surface temperature anomaly above 1.5 °C. *Nat. Clim. Chang.* 13, 127–129 (2023). [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1038/s41558-022-01568-2>"]
- Jones, P. D., P. Y. Groisman, M. Coughlan, N. Plummer, W.-C. Wang, and T. R. Karl (1990), Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land, *Nature*, 347, 169 – 172
- Liu, Pengfei et al. (2021) “Improved estimates of preindustrial biomass burning reduce the magnitude of aerosol climate forcing in the Southern Hemisphere” *Science Advances* 7(22) May 2021 [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1126/sciadv.abc1379>"]
- McKittrick, R.R. and P.J. Michaels (2007), Quantifying the influence of anthropogenic surface processes and inhomogeneities on gridded global climate data, *Journal of Geophysical Research*, 112, D24S09, doi:10.1029/2007JD008465.
- McKittrick, Ross and Joel Wood (2013) Co-fluctuation patterns of per capita carbon dioxide emissions: The role of energy markets. *Energy Economics* 39 pp. 1-12 [HYPERLINK "<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140988313000649>"]
- McKittrick, Ross R. (2010) [HYPERLINK "<https://www.rossmckittrick.com/uploads/4/8/0/8/4808045/spp.publishedversion.pdf>" \t "_blank"] [HYPERLINK "<http://www.degruyter.com/view/j/spp.2010.1.1/issue-files/spp.2010.1.issue-1.xml>"] Vol 1. No. 1., July 2010
- McKittrick, Ross R. (2013) Encompassing Tests of Socioeconomic Signals in Surface Climate Data. *Climatic Change* doi 10.1007/s10584-013-0793-5. Volume 120, Issue 1-2. [HYPERLINK "<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10584-013-0793-5>"]
- McKittrick, Ross R. and Nicolas Nierenberg (2010) [HYPERLINK "https://www.rossmckittrick.com/uploads/4/8/0/8/4808045/final_jesm_dec2010.formatted.pdf"]. [

- HYPERLINK "<http://iopscience.metapress.com/content/n83k07278212/>"], 35(3,4) pp. 149-175. DOI 10.3233/JEM-2010-0336
- McKittrick, Ross R., Mark Strazicich and Junsoo Lee (2012) “[HYPERLINK "<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/for.2248/abstract>" \t "_blank"]” *Journal of Forecasting*, Vol 32, Issue 5, pp 435-451 DOI: 10.1002/for.2248.
- Oke, T.R., 1973: City size and the urban heat island, *Atmospheric Environment* 7, 769-779
- Parker, D.E. (2006) “A Demonstration that Large-Scale Warming is not Urban.” *Journal of Climate* 19:2882—2895.
- Peterson, Thomas C., Kevin P. Gallo, Jay Lawrimore, Timothy W. Owen, Alex Huang, David A. McKittrick (1999) Global rural temperature trends. *Geophysical Research Letters* February 1999 [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1029/1998GL900322>"]
- Pielke, Roger and Ritchie, Justin (2020) “Systemic Misuse of Scenarios in Climate Research and Assessment” Social Sciences Research Network April 2020, available at: [HYPERLINK "<https://ssrn.com/abstract=3581777>"]
- Scaffeta, Nicola, Richard C. Willson, Jae N. Lee and Dong Wu (2019) Modeling Quiet Solar Luminosity Variability from T SI Satellite Measurements and Proxy Models during 1980–2018. *Remote Sensing* 11(21) 2569 [HYPERLINK "<https://doi.org/10.3390/rs11212569>"]
- Schoeberl, M.R., Y. Wang, G. Taha, D.J. Zawada, R. Ueyama and A. Dessler, 2024. Evolution of the climate forcing during the two years after the Hunga Tonga-Hunga Ha’apai eruption. *J. Geophys. Res.*, 129.
- Soon, W.; Connolly, R.; Connolly, M.; Akasofu, S.-I.; Baliunas, S.; *et al.* (2023) The Detection and Attribution of Northern Hemisphere Land Surface Warming (1850–2018) in Terms of Human and Natural Factors: Challenges of Inadequate Data. *Climate* 2023, 11, 179. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.3390/cli11090179>"]
- Spencer, Roy W, John R Christy and William D. Braswell (2025) Urban Heat Island Effects in U.S. Summer Surface Temperature Data, 1895–2023 *Journal of Applied Meteorology and Climatology* April 2025 [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1175/JAMC-D-23-0199.1>" \t "_blank"]
- Wickham C, R Rohde , RA Muller, J Wurtele, J Curry, *et al.* (2013) Influence of Urban Heating on the Global Temperature Land Average using Rural Sites Identified from MODIS Classifications. *Geoinformatics and Geostatistics: An Overview* 1:2.
- Zacharias, Pia (2014) An Independent Review of Existing Total Solar Irradiance Records. *Surveys in Geophysics* 35 pp. 897—912 [HYPERLINK "<https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-014-9294-y>"]

OUO – Official Use Only

PART II: CLIMATE RESPONSE TO CO₂ EMISSIONS

Formatted: Indent: Left: 0.3"

4 CLIMATE SENSITIVITY TO CO₂ FORCING

Chapter Summary

There is growing recognition that climate models are not fit for the purpose of determining the Equilibrium Climate Sensitivity (ECS) of the climate to increasing CO₂. The IPCC has turned to data-driven approaches including historical data and paleoclimate reconstructions, but their reliability is diminished by data inadequacies.

Data-driven ECS estimates tend to be lower than climate model-generated values. The IPCC AR6 upper bound for the likely range of ECS is 4.0°C, lower than the AR5 value of 4.5°C. This lowering of the upper bound seems well justified by paleoclimatic data. The IPCC AR6 lower bound for the likely range of ECS is 2.5°C, substantially higher than the AR5 value of 1.5°C. This raising of the lower bound is less well justified; evidence since the AR6 finds the lower bound of the likely range to be around 1.8°C.

4.1 Introduction

The climate's response to increasing concentrations of CO₂ is central to the scientific debate on anthropogenic climate change, and so also to the public debate on "climate action." The simplest measure of that response is the rise in the global average surface temperature, quantified by the Equilibrium Climate Sensitivity (ECS). ECS is defined as the amount of warming expected in response to a doubling of CO₂ from its pre-industrial concentration of 280 ppm, after all climate components have had time to adjust. Some components, like temperatures in the lower atmosphere (troposphere), adjust rapidly, while others such as the deep ocean and cryosphere might take as long as centuries. A related measure, the Transient Climate Response (TCR), better describes the shorter time scales; it is defined as the amount of warming when the CO₂ concentration is doubled by rising one percent annually for 70 years.

The 1979 Charney Report for the U.S. National Academy of Sciences (National Research Council 1979) proposed that the most likely ECS was $3.0 \pm 1.5^\circ\text{C}$. The IPCC repeatedly reaffirmed that range with only minor variations until its most recent AR6. AR5 termed 1.5–4.5°C as the *likely* range (66 percent probability) and stated that ECS is *extremely unlikely* (95 percent probability) to be below 1.0°C and *very unlikely* (90 percent probability) to exceed 6.5°C.

Formatted: Font: Italic

The uncertainty in ECS has remained stubbornly wide, despite many individual studies that claimed to narrow it (Hausfather 2023). Most recently, AR6 narrowed the *likely* range to 2.5–4.0°C and deemed the *very likely* range to be 2.0–5.0°C. This narrowing on the low end is disputed, as will be discussed below.

Uncertainties in ECS are highly consequential for policy making. As will be discussed in Chapter 11, economic models use ECS values to project the costs of CO₂ emissions. The traditional value (3.0 °C) has typically yielded modest global social costs of CO₂ emissions, sufficient to justify some policy actions, but mostly deferred to later in this century. If ECS is very high (above 4.5°C) immediate aggressive emission controls become more imperative, whereas no CO₂ emission controls are economically justifiable for ECS below 2.0°C (Dayaratna *et al.* 2016, 2020). Obtaining a precise estimate is impossible, so policy making needs to account for the uncertainty.

By itself, the equilibrium warming effect of a doubling of atmospheric CO₂ is slightly more than 1°C (Soden and Held 2006). Larger values of ECS arise from positive feedbacks that amplify the CO₂ warming. Water vapor feedback is positive: a warmer atmosphere may have more water vapor, which itself is a powerful greenhouse gas. Warmer temperatures also result in less snow and sea ice cover, allowing the

Earth to absorb more of the sun's radiation. Some simple estimates of these feedbacks increase the ECS to around 2°C (Sherwood *et al.*, 2020). Larger values of ECS are associated with positive cloud feedbacks.

Climate scientists use multiple lines of evidence to determine the Equilibrium Climate Sensitivity:

- Climate model simulations
- Historical observations
- Paleoclimatic reconstructions
- Process understanding of feedbacks

4.2 Model-based estimates of climate sensitivity

The ECS ranges given in IPCC AR4 and AR5 were obtained primarily by examining the behavior of large-scale climate models, also called General Circulation Models (GCMs). However, the IPCC changed course in its AR6 when it turned to a more direct data-driven methodology. Here we discuss some of the pitfalls of using GCMs to try to determine the Earth's climate sensitivity.

ECS is an emergent property of GCMs—that is, it is not directly parameterized or tuned. Historically, collections of parameterizations have been chosen to produce an expected value of climate sensitivity, particularly with regards to sub-grid-scale cloud processes, particularly in AR4 and to a lesser extent in AR5. Otherwise plausible GCMs and parameter selections have been discarded because of perceived conflict with this warming rate, or aversion to a model's climate sensitivity being outside an accepted range. For example, even in a CMIP6 model, Mauritsen and Roeckner (2020) state the following regarding their Max Planck Institute climate model (emphasis added):

“We have documented how we tuned the MPI-ESM1.2 global climate model to match the instrumental record of warming; an endeavor which has clearly been successful. Due to the historical order of events, the choice was to do this practically by *targeting an ECS of about 3 K using cloud feedbacks*, as opposed to tuning the aerosol forcing.”

In other words, the modelers chose an ECS value of 3°C and then tuned the cloud parameterizations to match their intended result.

As noted, direct warming from CO₂ doubling is only about 1°C (Soden and Held 2006); further warming arises from climate feedbacks that are not explicitly resolved by the GCM but rely on parameterizations of physical processes. Higher values of ECS arise primarily from assumed positive cloud feedbacks, whereas the magnitude and even the sign of the feedbacks are very uncertain. Elements of cloud feedback include changes in the latitudinal distribution of clouds, changes in the distribution of cloud height (changes in low versus high clouds), changes to the phase of clouds (ice versus liquid), changes in cloud particle size (associated with changes in concentration and/or composition of aerosol particles), changes in the precipitation efficiency of clouds, and even changes in how clouds are distributed over the daily solar cycle (Curry and Webster, 1999). It is difficult for GCMs to simulate any of these processes correctly owing to their small scale, let alone predict how they will change in the future. Further, cloud processes modulate the magnitudes of the water vapor, lapse rate, and the surface albedo feedbacks.

ECS can be determined from climate model simulations by doubling the concentration of CO₂ and allowing several centuries for the warming to equilibrate. To avoid the necessity of such long simulations, “effective climate sensitivity” is commonly evaluated from a 150-year simulation in response to a sudden quadrupling of CO₂.

The spread of ECS values from the CMIP5 ensemble of climate models used in the AR5 was 2.0–4.7°C; that range increased for the CMIP6 models used in the AR6 to between 1.8 and 5.7°C (Chen *et al.*, 2021, Scafetta 2021, see Figure 4.1). Far from settling the model-based sensitivity of climate system uncertainties appear to be growing. The main cause of the overall upward shift in ECS in CMIP6 relative to CMIP5 is a larger positive cloud feedback, driven by changes to the cloud parameterizations in many CMIP6 models (Zelinka *et al.*, 2020)

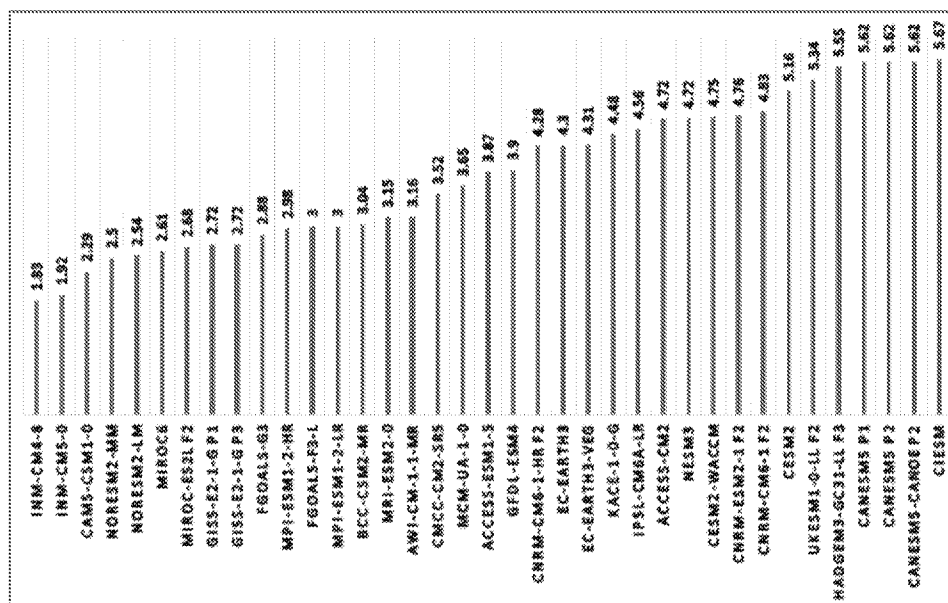


Figure 4.1 Equilibrium Climate Sensivities in °C of 37 climate models from the CMIP6 ensemble. Identifiers for the various models appear along the horizontal axis. From (Scafetta, 2021)

Because of concerns about model tuning and the high sensitivity to cloud parameterizations, the IPCC AR6 (2021) did not rely on climate model simulations in their assessment of climate sensitivity, relying instead on data-driven methods.

4.3 Data-driven estimates of climate sensitivity

Climate sensitivity can also be estimated from instrumental records of surface temperatures and ocean heat content, combined with estimates of how climate forcings (e.g., greenhouse gases, solar, volcanoes, aerosols) have changed in the past (Otto *et al.*, 2013). Using this information, a simple empirical model called an Energy Balance Model can be employed. It requires estimating a feedback parameter whose uncertainties are highly amplified in the resulting ECS (Roe and Baker, 2007).

The accuracy of the data-driven methods depends on the quality of the input data. Assumptions are needed about ocean heat storage, and good data is only available for recent decades. The greatest source of uncertainty is the amount and composition of aerosol particles and their interactions with cloud radiative properties (the so-called aerosol indirect effect; see Figures 3.1.1, 3.1.2). Climate models exhibit warming in response to GHGs but cooling in response to aerosols (Schwartz *et al.*, 2007). Observed 20th century warming can be shown to be consistent either with low ECS and low aerosol cooling, or high ECS and high aerosol cooling. Since fossil fuel use adds both GHGs and aerosols to the atmosphere, both effects need to be estimated to isolate the warming effect of CO₂. Over time, the IPCC's estimate of the cooling effect of aerosols has declined (Lewis, 2023).

Paleoclimate proxies are also used to evaluate the sensitivity of past climates by comparing paleoclimate changes in the Earth's temperatures to estimates of changes in forcings. The two most informative periods are the last glacial maximum (around 20,000 years ago), which was about 3–7°C colder than today, and a mid-Pliocene period (roughly three million years ago), which was 1–3°C warmer than today. The limits on cooling during the last glacial maximum give the best single evidence that high values of climate sensitivity are unlikely. However, paleoclimate estimates are associated with very large uncertainties in the estimated temperatures and forcings. Further, estimates of climate sensitivity based on past climate states may not be applicable to the current state of the climate system.

A recurring theme in the climate literature is that ECS estimates based on historical data are smaller than ECS estimates inferred from climate models (Sherwood and Forest 2024). About 15 estimates based on historical data appeared in the peer-reviewed literature between 2012 and 2024 yielding ECS best estimates between 1.0°C and 2.5°C, although critics have questioned some of the methods and the data quality. For the AR6, the IPCC placed primary weight on the results of Sherwood *et al.* (2020) that combined historical and paleoclimate proxies with the process-based approach and yielded a best estimate of 3.1°C with a *likely* range of 2.6–3.9°C. Lewis (2022) raised a number of concerns about this result, including methodological errors, outdated input values, and use of subjective ~~versus objective~~ Bayesian priors in the analysis. Lewis' analysis found that climate sensitivity is estimated to be much lower and better constrained than in the Sherwood *et al.* analysis – median 2.2°C (1.8–2.7°C in the 17–83 percent *likely* range, and 1.6–3.2°C in the 5–95 percent *very likely* range). The IPCC AR6 estimated only a 5 percent probability that ECS was below 2.3°C, whereas Lewis estimated it to be over 50 percent. The most recent publications on the debate between Sherwood *et al.* and Lewis further defend their respective positions (Sherwood and Foster (2024) and Lewis (2025)).

An argument emphasized in AR6 is that data-driven ECS estimates might understate the future warming response to GHGs because of a so-called “pattern effect” (Forster *et al.*, 2021). The tropical Pacific is believed to *strongly influence* the overall efficiency with which the Earth radiates heat to space, but some regions remove heat more efficiently than others. If the west-to-east temperature gradient in the tropical Pacific is weakened in a warming climate, warming would concentrate where heat is less efficiently removed, raising ECS.

Most climate models simulate that rising GHGs will weaken the west-east temperature gradient, which led the IPCC in the AR6 to conclude that data-driven ECS estimates understated the *future* ECS value. However, Seager *et al.* (2019) pointed out that, contrary to models, the west-east temperature gradient has been strengthening over time. They further argued that the mechanism predicting otherwise in climate models was based on a faulty characterization of oceanic dynamics and there is no reason to expect the gradient to weaken. A similar argument was recently made by Lee *et al.* (2024), who concluded that “the trajectory of the observed trend reflects the response to increasing GHG loading in the atmosphere”; in other words, GHG warming should lead to a future strengthening rather than a weakening of the temperature gradient. Increased efficiency of atmospheric cooling implies, if anything, that the future ECS in a warming climate may be *lower* than current estimates.

4.4 Transient Climate Response

The Transient Climate Response (TCR) provides a more useful observational constraint on climate sensitivity. TCR is the global temperature increase that results when CO₂ is increased at an annual rate of 1 percent over a period of 70 years (*i.e.*, doubled gradually). Relative to the ECS, observationally determined values of TCR avoid the problems of uncertainties in ocean heat uptake and the fuzzy boundary in defining equilibrium arising from a range of timescales for the longer-term feedback processes (*e.g.*, ice sheets). TCR is more generally related to peak warming and better constrained by historical warming, than ECS. IPCC AR6 judged the *very likely* range of TCR to be 1.2–2.4°C. In contrast to ECS, the upper bound of TCR is more tightly constrained. For comparison, the TCR values determined by Lewis (2023) are 1.25 to 2.0°C, showing much better agreement with the AR6 values than was seen in a comparison of the ECS values.

As will be discussed in Chapter 5, a real-world ECS smaller than the model average is supported by studies that show climate models on average overestimate the observed surface and troposphere warming over the past 50 years. Lower sensitivities also align with evidence from consistent fingerprinting (Chapter 8), where model responses need to be downscaled to align with observed trends.

References

- Carbon Brief. (2020, July 22). Explainer: How scientists estimate climate sensitivity. [HYPERLINK "https://www.carbonbrief.org/explainer-how-scientists-estimate-climate-sensitivity"]
- Carbon Brief. (2020, July 22). Guest post: Why low-end ‘climate sensitivity’ can now be ruled out. [HYPERLINK "https://www.carbonbrief.org/guest-post-why-low-end-climate-sensitivity-can-now-be-ruled-out"]
- Carbon Brief. (2021, August 9). In-depth Q&A: The IPCC’s sixth assessment report on climate science. [HYPERLINK "https://www.carbonbrief.org/in-depth-qa-the-ipccs-sixth-assessment-report-on-climate-science"]
- Chen, D., *et al.* (2021). Framing, context, and methods. In V. Masson-Delmotte *et al.* (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Curry, J. A., & Webster, P. J. (1999). Thermodynamic feedbacks in the climate system. In *Thermodynamics of atmospheres and oceans* (pp. 351–385). Academic Press.
- Dayaratna, Kevin, Ross McKittrick and David Kreutzer (2017) Empirically-Constrained Climate Sensitivity and the Social Cost of Carbon. *Climate Change Economics* April 2017 DOI: [HYPERLINK "http://dx.doi.org/10.1142/S2010007817500063"]
- Dayaratna, Kevin, Ross McKittrick and Patrick J. Michaels (2020) Climate Sensitivity, Agricultural Productivity and the Social Cost of Carbon in FUND. *Environmental Economics and Policy Studies* https://doi.org/10.1007/s10018-020-00263-w
- Forster, P., *et al.* (2021). The Earth’s energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. In V. Masson-Delmotte *et al.* (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Hausfather, Z. (2020, July 22). Explainer: How scientists estimate climate sensitivity. Carbon Brief. [HYPERLINK "https://www.carbonbrief.org/explainer-how-scientists-estimate-climate-sensitivity"]
- Lan, X., Tans, P., & Thoning, K. W. (2025). Trends in globally-averaged CO₂ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. NOAA Global Monitoring Laboratory. [HYPERLINK "https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07"]
- Lee, S., Byrne, M. P., Loikith, P. C., & O’Dell, C. W. (2024). Zonal contrasts of the tropical Pacific climate predicted by a global constraint. *Climate Dynamics*, 62(1–2), 229–246. [HYPERLINK "https://doi.org/10.1007/s00382-023-06741-7"]

- Lewis, N. (2023). Objectively combining climate sensitivity evidence. *Climate Dynamics*, 61(9–10), 3155–3163. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1007/s00382-022-06398-8>"]
- Lewis, N. (2025). Comment on “Can uncertainty in climate sensitivity be narrowed further?” by Sherwood and Forest (2024). *EGUsphere* [preprint]. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1179>"]
- Mauritsen, T., & Roeckner, E. (2020). Tuning the MPI-ESM1.2 global climate model to improve the match with instrumental record warming by lowering its climate sensitivity. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, e2019MS002037. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1029/2019MS002037>"]
- Otto, A., Otto, F. E. L., Boucher, O., Church, J., Hegerl, G., Forster, P. M., Gregory, J. M., & Johnson, G. C. (2013). Energy budget constraints on climate response. *Nature Geoscience*, 6(6), 415–416. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1038/ngeo1836>"]
- Pachauri, R. K., & Meyer, L. (Eds.). (2015). Climate change 2014: Synthesis report. *Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Roe, G. and M. Baker (2007). Why is climate sensitivity so unpredictable? *Science* 318, 629-632. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1126/science.1144735>"]
- Scafetta, N. (2021). Testing the CMIP6 GCM simulations versus surface temperature records from 1980–1990 to 2011–2021: High ECS is not supported. *Climate*, 9(11), 161. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.3390/cli9110161>"]
- Schwartz, S. E., R. J. Charlson, H. Rodhe (2007). Quantifying climate change—Too rosy a picture? *Nature Climate Change* 1, 23–24, [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1038/climate.2007.22>"]
- Seager, R., Cane, M., Ting, M., Naik, N., Clement, A., DiNezio, P., & Lee, D. E. (2019). Strengthening tropical Pacific zonal sea surface temperature gradient consistent with rising greenhouse gases. *Nature Climate Change*, 9(7), 517–522. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1038/s41558-019-0505-x>"]
- Sherwood, S. C., & Forest, C. E. (2024). Opinion: Can uncertainty in climate sensitivity be narrowed further? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(5), 2679–2686. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.5194/acp-24-2679-2024>"]
- Sherwood, S. C., Bony, S., Boucher, O., Bretherton, C. S., Forster, P. M., Gregory, J. M., & Stevens, B. (2020). An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence. *Reviews of Geophysics*, 58(4). [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1029/2019rg000678>"]
- Soden, B. J., and I.M. Held (2006). An assessment of climate feedbacks in coupled ocean–atmosphere models. *Journal of Climate*, 19(14), 3354–3360. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1175/jcli3799.1>"]
- Zelinka, M. D., Myers, T. A., McCoy, D. T., Po-Chedley, S., Caldwell, P. M., Ceppi, P., Klein, S. A., & Taylor, K. E. (2020). Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models. *Geophysical Research Letters*, 47, e2019GL085782. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1029/2019GL085782>"]

5 MODELS VERSUS OBSERVATIONS IN THE RECENT PAST

Chapter summary

Climate models show warming biases in many aspects of their reproduction of the past several decades. In response to estimated changes in forcing they produce too much warming at the surface (except in the models with lowest ECS), too much warming in the lower-and mid-troposphere and too much amplification of warming aloft.

Climate models also produce too much recent stratospheric cooling, invalid hemispheric albedos, too much snow loss, and too much warming in the Corn Belt. The IPCC has acknowledged some of these issues but not all.

5.1 Introduction

Climate models are the primary tool used to project future climate changes in response to increasing atmospheric levels of anthropogenic greenhouse gases. To assess the fitness of climate models for this purpose, it is reasonable to ask how well they reproduce the current climate and its variations over the past century. The nearby box “Climate modeling” gives some detail on how climate models work.

Of great concern is the fact that, after several decades of the climate modeling enterprise involving approximately three dozen models operated by research centers around the world, the range of future warming they produce in response to a hypothetical doubling of atmospheric CO₂ extends over a factor of three, as we discussed in the previous chapter. This range of disagreement among models has not ~~changed~~ decreased for decades.

Problems with climate models are not just in their disagreement over the future, but also in their ability to replicate the recent past. Here we review some of the most important metrics of climate model accuracy: ability to reproduce historical surface, tropospheric and stratospheric temperature trends; ability to reproduce the vertical warming profile; and ability to reproduce other climate features such as snowfall. In all cases a persistent finding is that models on average err on the side of too much warming in response to estimated historical forcings.

BOX: Climate modeling

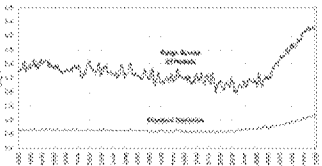
Most climate models, except for the simplest ones, represent Earth's land surface using a grid of squares on the order of 100 km wide. To simulate the atmosphere, typically 30 or more grid boxes are stacked above these squares. The ocean is modeled using a similar but finer grid, resulting in tens of millions of grid boxes for the atmosphere and oceans.

The computer models, based on physical laws, calculate how air, water, and energy move between grid boxes over time. The time step can be as small as 10 minutes, and repeating this process millions of times allows the simulation of climate over centuries. Running these models, even on the most powerful supercomputers, can take months. Comparing simulation results with historical climate data helps assess the accuracy of a model, while projections into the future estimate climate changes under assumed human and natural influences.

Despite sounding straightforward, climate modeling is highly complex. Many critical processes occur at scales smaller than the grid size. For instance, the flows of sunlight and heat in the atmosphere depend strongly on cloud cover. Since tracking individual clouds is impractical, researchers must make “subgrid” assumptions about the distribution of clouds in each grid box. Snow and ice cover, which affects how much sunlight is reflected or absorbed by the surface, is another subgrid factor.

Each subgrid assumption requires numerical parameters, which must be carefully set. Modelers initially estimate these parameters based on physics and observed climate patterns, then run the model. Because early results often diverge significantly from real-world observations, they “tune” these parameters to better match observed climate features. Different modeling teams use distinct assumptions and tuning strategies, leading to varied outcomes. Tuning is a necessary but delicate aspect of climate modeling, as it is in any complex system. Poor tuning can result in inaccurate simulations, while excessive tuning risks artificially steering results toward predetermined conclusions.

The spread of model indicators—Earth's 1880 (Figure 6.25). century warming w physical processes.



very wide. One of the most basic about 3°C across CMIP6 models prior to es to over 4 °C. For comparison 20th sts substantial differences among models’

Figure 6.25.1 CMIP6 Average surface temperature range across 33 models and standard deviation using SSP5-85 scenario. Data from KNMI Climate Explorer website at [[HYPERLINK "https://climexp.knmi.nl/start.cgi"](https://climexp.knmi.nl/start.cgi) \t "_blank"].

Beyond the models' ability to reproduce features of today's climate, the critical issue for society is how well they predict responses to subtle human influences, such as greenhouse gas emissions, aerosol cooling, and land-use changes. The most crucial aspect that models must capture correctly is “feedbacks.” These occur when climate changes triggered by greenhouse gases either amplify or suppress further warming. In general, the modeled net effect of all feedbacks doubles or triples the direct warming impact of CO₂.

5.2 Surface warming

A straightforward test of a climate model's validity is its ability to reproduce historical warming in response to known past changes in climate drivers such as greenhouse gases. Figure 5.2 is reproduced from Scafetta (2023), a peer-reviewed study that groups the latest-generation (CMIP6) climate models into low ECS (1.5 to 3.0 degrees C), medium ECS (3.0 to 4.5 degrees C) and high ECS (4.5 to 6.0 degrees C), and compares their post-1980 global average temperature simulation ranges to those of three surface temperature records and one satellite-based lower troposphere temperature data product.

The leftmost column shows that the low-ECS models track the post-1980 historical warming record reasonably well, but the middle and right columns show that the medium- and high-ECS models conspicuously over-predict the warming.

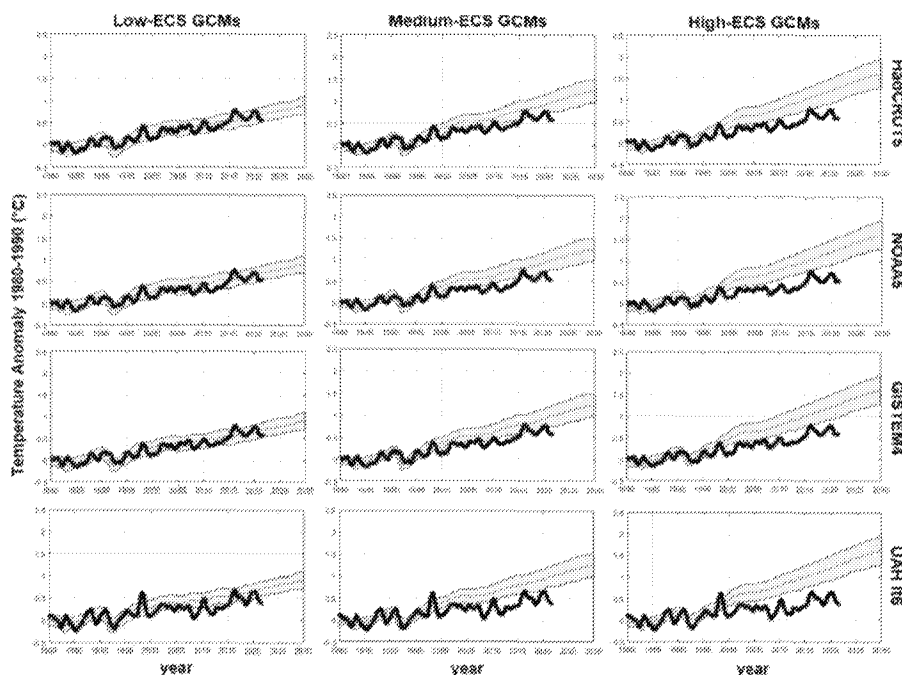


Figure 5.2: Model-Observational comparisons for Earth's surface warming. The columns correspond to model groups showing low-ECS to high-ECS, while the rows correspond to widely-used observed temperature records, the first three showing surface averages and the fourth showing the lower troposphere average. In each panel the yellow area denotes the mean and range ($\pm$ one standard deviation) of climate model simulations for that group. The thick black line shows the observed annual average temperature in the indicated source. Source: Scafetta (2023) Fig.2.

Spencer (2024) has also provided a useful summary of the Model-Observation mismatch by comparing trends in surface temperature data products with those in individual climate models, as summarized in Figure 5.3. It is seen that most climate models show substantially more warming than the observations.

Formatted: Font color: Auto

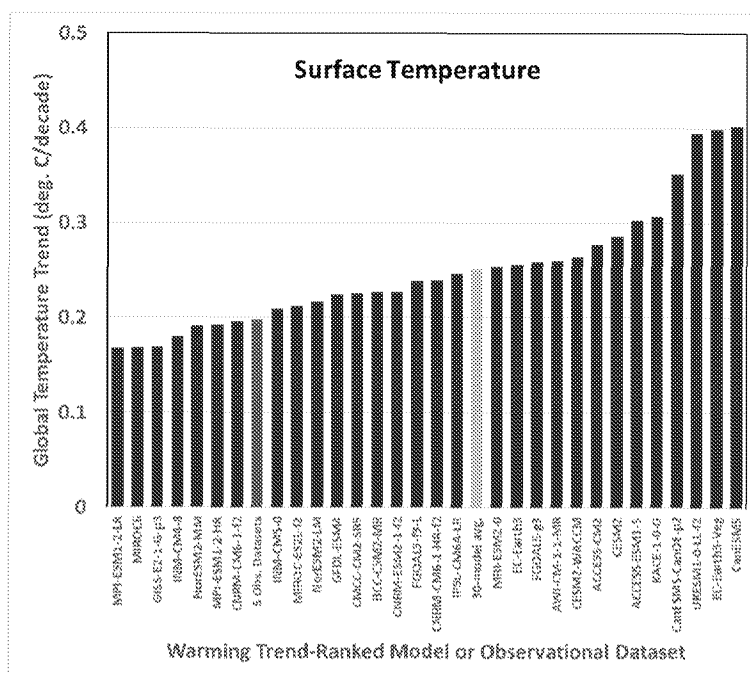


Figure 5.3 Global surface air temperature trends ($^{\circ}\text{C}/\text{decade}$), 1979–2024, from various CMIP6 climate models (red, 30-model average in orange); and the average of three thermometer datasets (HadCRUT5, NOAA Global Temp, and Berkeley 1 deg.) and two reanalysis datasets (ERA5 and NCEP/NCAR R1) in blue. [Data Source: https://climexp.knmi.nl/start.cgi](https://climexp.knmi.nl/start.cgi), Spencer (2024) updated

5.3 Tropospheric warming

It has long been known that climate models on average overstate warming in the tropical troposphere. This region is an important test of the climate models since this is where the signal of anthropogenic greenhouse warming emerges first and most strongly. Biases in tropospheric trends indicate model flaws in heat transfer processes and that carry over to surface warming biases.

The discrepancy was flagged as a serious inconsistency in the first U.S. Climate Change Science Program report (Karl *et al.* 2006) and has been mentioned in every IPCC report since, but the discrepancy has gotten worse over time, and the bias is now global. McKittrick and Christy (2020) compared tropospheric warming trends in CMIP6 climate models to observed trends from satellites, weather balloons and reanalysis systems. Every model overpredicted the average observed warming trend over 1979-2014 in both Lower- and Mid-Troposphere layers, both globally and in the tropics. In most individual models the bias was statistically significant and on average across models it was highly significant.

Figure 5.4 presents the comparisons with data updated to 2024 (McKittrick and Christy 2025). The recent warm years moved the observed trend up slightly and widened the trend confidence intervals but the overall pattern remains the same: model bias is towards too much warming, in most cases the difference is statistically significant and on average the bias is statistically highly significant. McKittrick and Christy (2020) also showed that the bias is larger in high-ECS models, but even the models with lower average ECS predict too much warming. If future climate models were to realistically represent global tropospheric warming, they would likely be less sensitive than even the low-ECS members of the CMIP6 ensemble.

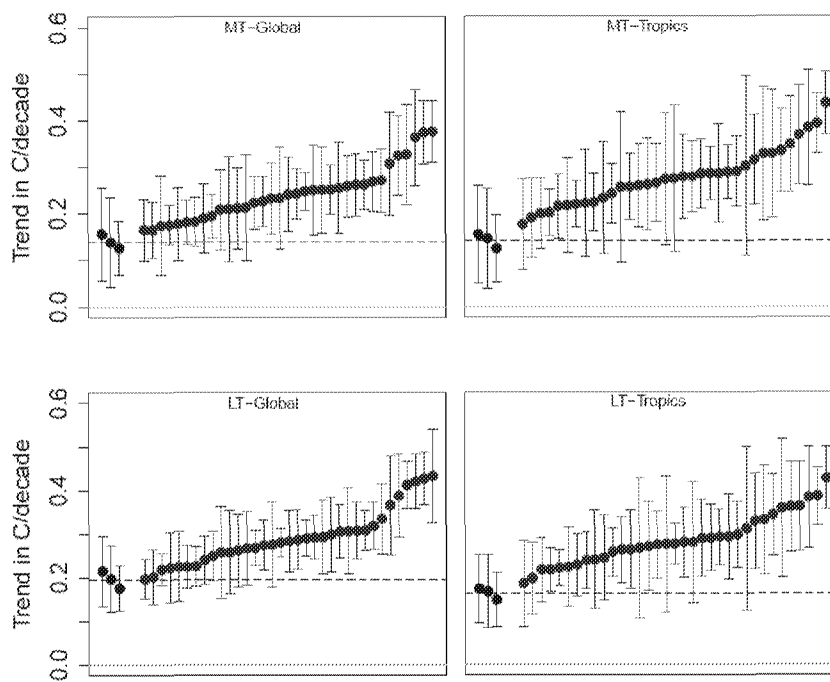


Figure 5.4: Observed versus CMIP6 modeled warming trends (°C/decade 1979-2024) in the global and tropical lower (LT) and mid-troposphere (MT). Uses methodology of McKittrick and Christy (2020) on updated data updated from 2014 to 2024. Blue dots: warming trends with 95 percent confidence intervals for 3 data products (radiosondes, reanalysis, and satellites). Blue dashed line: warming trend average for 3 observed series. Red dots: modeled warming trends with 95 percent confidence intervals in 35 models arranged lowest to highest.

As mentioned previously, the IPCC has long acknowledged the model-observation mismatch. For example AR6 pp. 443-444 offers this on the tropical troposphere (it does not address the global comparison):

Several studies since AR5 have continued to demonstrate an inconsistency between simulated and observed temperature trends in the tropical troposphere, with models simulating more warming than observations (Mitchell *et al.*, 2013, 2020; Santer *et al.*, 2017a, b; McKittrick and Christy, 2018; Po-Chedley *et al.*, 2021)... Over the 1979–2014 period, models are more consistent with observations in the lower troposphere, and least consistent in the upper troposphere around 200 hPa, where biases exceed 0.1°C per decade. Several studies using CMIP6 models suggest that differences in climate sensitivity may be an important factor contributing to the discrepancy between the simulated and observed tropospheric temperature trends (McKittrick and Christy, 2020; Po-Chedley *et al.*, 2021), though it is difficult to deconvolve the influence of climate sensitivity, changes in aerosol forcing and internal variability in contributing to tropospheric warming biases (Po-Chedley *et al.*, 2021). Another study found that the absence of a hypothesized negative tropical cloud feedback could explain half of the upper troposphere warming bias in one model (Mauritsen and Stevens, 2015).

... In summary, studies continue to find that CMIP5 and CMIP6 model simulations warm more than observations in the tropical mid- and upper-troposphere over the 1979–2014 period (Mitchell *et al.*, 2013, 2020; Santer *et al.*, 2017a, b; Suárez-Gutiérrez *et al.*, 2017; McKittrick and Christy, 2018), and that overestimated surface warming is partially responsible (Mitchell *et al.*, 2013; Po-Chedley *et al.*, 2021). ... Hence, we assess with *medium confidence* that CMIP5 and CMIP6 models continue to overestimate observed warming in the upper tropical troposphere over the 1979–2014 period by at least 0.1°C per decade,

Notably, despite the accumulation of evidence of excess model warming the IPCC only assigns *medium confidence* to the existence of a warming bias.

5.4 Vertical temperature profile mismatch

Another important model-observational discrepancy is the excess amplification with altitude found in climate models. The comparison was in the IPCC AR5 Chapter 10, although only in the online supplement (Figure 10.SM.1) and only in a figure whose formatting obscured the point. Figure 10.SM.1 is not referenced in the main IPCC report nor in any summary so readers would not have been aware of it. Although not apparent at first glance, it shows that the 1979-2010 warming in the lower troposphere is so small as to be consistent with no GHG forcing at all and is inconsistent with the model runs that do have GHG forcing. In Figure 5.6 we adapt IPCC AR5 Figure 10.SM.1 to draw out this critical point.

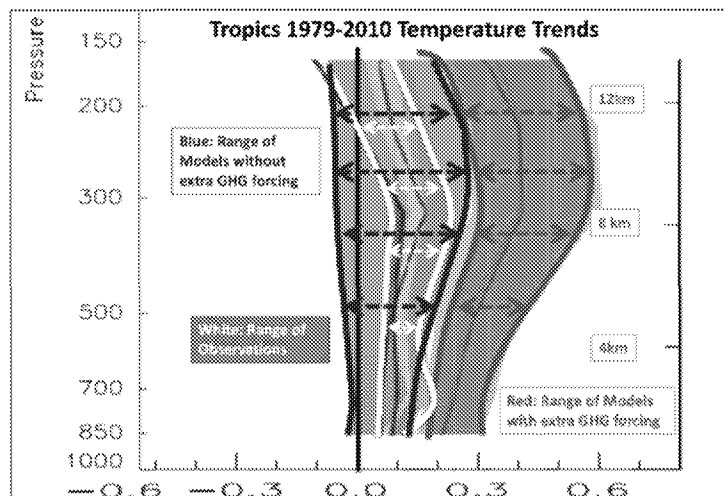


Figure 5.6: Vertical warming pattern for tropics (20S to 20N). Source: Annotated version of IPCC AR5 Figure 10.SM.1

Figure 5.6 compares model and observational temperature trends by altitude between 20S and 20N (the tropics). In this region where the models say the warming should be strongest, the observations (shown here in white) lie within the blue “No CO₂” band and entirely outside the “with CO₂” red envelope. This means that in the entire tropical atmospheric column from the surface to the base of the stratosphere, observed warming trends are so small as to be consistent with the output of models that have no anthropogenic CO₂ warming, and inconsistent with the entire envelope of warming trends generated by models forced with increased CO₂.

A similar comparison is shown in Christy and McNider (2017), an updated version of which (covering 1979-2024) is reproduced as Figure 5.7. Modeled temperature trends exceed observations from the surface through the top of the troposphere, with observed trends below the entire model range at most pressure levels. Also shown in Figure 5.7 is the tropical tropospheric temperature (TTT) average from three satellite data products (NOAA, UAH and RSS) compared to the same layer average from climate models for 1979-2024. Again, the observed trends lie below the entire model range.

The wide range of choices made by modelers to characterize the physical processes in the models (see Box: Climate Modeling in Section 5.1 above) is seen by the large spread of trends in the middle troposphere, ± 40 percent about the median (Fig. 5.7). This vividly illustrates the uncertainties in attempts to model (parameterize) a complex system involving turbulence, moist thermodynamics, and energy fluxes over the full range of the tropical atmosphere’s time and space scales.

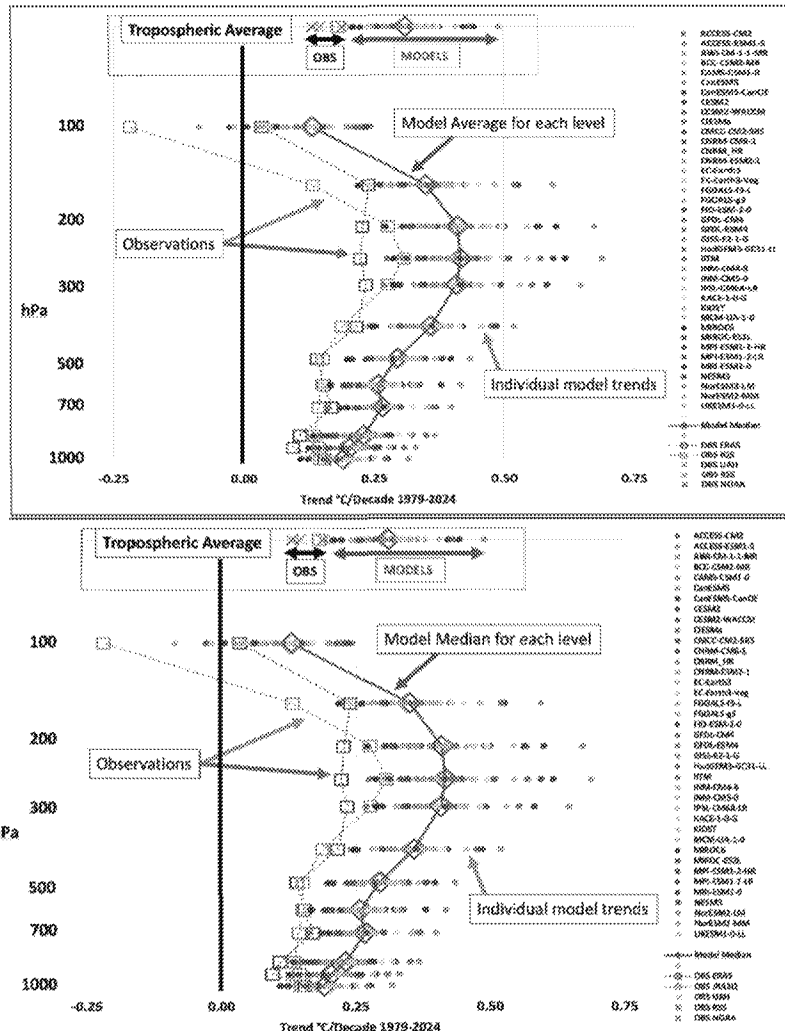


Figure 5.7: Modeled versus observed warming, tropical troposphere. Source: updated from Christy and McNider (2017) including data through 2024. Red line: model average. Green and blue lines: observational series (reanalysis).

This discrepancy has been the source of much controversy, with some arguing that even if there is very little observed warming aloft in the tropics, a “hotspot” still exists in the sense that the warming aloft is greater than at the surface (Santer et al. 2008). But there is good evidence that models also exaggerate the amplification rate. Klotzbach et al. (2009), showed that models project greater amplification with altitude

than is observed. This result was subsequently confirmed by detailed time series analysis (Vogelsang and Nawaz 2016) who found that the model-observational difference is statistically significant.

The atmosphere's temperature profile is a case where models are not merely uncertain but also show a common warming bias relative to observations. This suggests that they misrepresent certain fundamental feedback processes.

The IPCC AR6 did not assess this issue.

5.5 Stratospheric cooling

An important element of the expected general “fingerprint” of anthropogenic climate change is simultaneous warming of the troposphere and cooling of the stratosphere. The IPCC AR6 acknowledged that cooling had been observed but only until the year 2000. The stratosphere has shown some warming since, contrary to model projections.

The AR6 WGI Ch 2 pp. 327-9 states:

Temperatures averaged through the full lower stratosphere (roughly 10–25 km) have decreased over 1980–2019 in all data products, with the bulk of the decrease prior to 2000. The decrease holds even if the influence of the El Chichon (1982) and Pinatubo (1991) volcanic eruptions on the trend, found by Steiner *et al.* (2020a) to have increased the 1979–2018 cooling trend by 0.06°C per decade, is removed. Most datasets show no significant or only marginally significant trends over 2000–2019, and the results of Philipona *et al.* (2018) show weak increases over 2000–2015 in the very lowermost stratosphere sampled by radiosondes...

It is virtually certain that the lower stratosphere has cooled since the mid-20th century. However, most datasets show that lower stratospheric temperatures have stabilized since the mid-1990s with no significant change over the last 20 years. It is likely that middle and upper stratospheric temperatures have decreased since 1980, but there is low confidence in the magnitude.

The cited source, Philipona *et al.* (2018), in an article entitled “Radiosondes Show That After Decades of Cooling, the Lower Stratosphere Is Now Warming”, stated:

In response to continued greenhouse gas increases and stratospheric ozone depletion, climate models project continued tropospheric warming and stratospheric cooling over the coming decades. Global average satellite observations of lower stratospheric temperatures exhibit no significant trends since the turn of the century. In contrast, an analysis of vertically resolved radiosonde measurements from 60 stations shows an increase of lower stratospheric temperature since the turn of the century at altitudes between 15 and 30 km and over most continents. Trend estimates are somewhat sensitive to homogeneity assessment choices, but all investigated radiosonde data sets suggest a change from late twentieth century cooling to early 21st century warming in the lower stratosphere.

A combination of tropospheric warming and stratospheric cooling is a commonly-cited “fingerprint” of anthropogenic warming. Stratospheric warming since 2000 coincides with continued surface and tropospheric warming, a pattern that is not found in climate model simulations and is not apparently consistent with the anthropogenic fingerprint.

5.6 Snow cover mismatch

Data compiled by the Rutgers University SnowLab show that Northern Hemisphere winter snowcover is not decreasing (Figure 5.8); if anything, it shows an increasing trend.

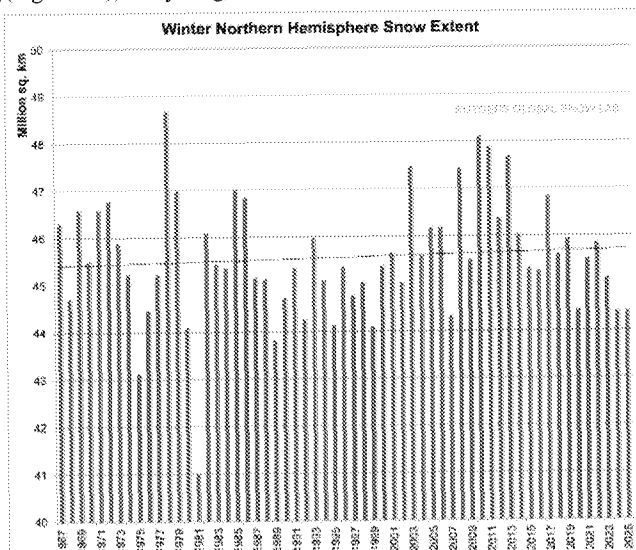


Figure 5.8: Northern Hemisphere Winter Snow extent.

Source: [HYPERLINK

"https://climate.rutgers.edu/snowcover/chart_seasonal.php?ui_set=nhand&ui_season=1"]
(accessed May 27, 2025)

Yet models project declining Northern Hemisphere snow cover in a warming climate, as described by Connolly *et al.* (2019).

The climate models were found to poorly explain the observed trends [in Northern Hemisphere snow cover]. While the models suggest snow cover should have steadily decreased for all four seasons, only spring and summer exhibited a long-term decrease, and the pattern of the observed decreases for these seasons was quite different from the modelled predictions. Moreover, the observed trends for autumn and winter suggest a long-term increase, although these trends were not statistically significant.

AR6 largely confines its discussion of changing Northern Hemisphere snow cover extent (SCE) to the Spring season, for which models and observations agree on a downward trend. Regarding Winter changes it remarks as follows (AR6 WGI Ch. 2 p. 344):

Assessment of SCE trends in the NH since 1978 indicates that for the October to February period there is substantial uncertainty in trends with the sign dependent on the observational product. Analysis using the NOAA Climate Data Record shows an increase in October to February SCE (Hernández-Henríquez *et al.*, 2015; Kunkel *et al.*, 2016) while analyses based on satellite borne optical sensors (Hori *et al.*, 2017) or multi-observation products (Mudryk *et al.*, 2020) show a negative trend for all seasons.

AR6 WGI Chapter 9 (p. 1284) points out that the NOAA Climate Data Record showing increased fall and winter SCE is inconsistent with land-based observations and model-based data sets. It notes that using optical satellite imagery to infer SCE in winter is challenging due to cloud cover and decreased solar illumination in winter months. Focusing on the Pacific Coast states (CA, OR and WA) cold season mountain snowfall that melts in spring and summer provides a substantial portion of warm season water resources. A comprehensive reconstruction of snowfall for the main source regions (Cascades and Sierra Nevada Mountains) indicates no significant trends in annual totals since the late 19th century (Christy 2022).

In summary, the up-to-date Rutgers SCE database indicates a mismatch between models and observations. Further work to reconcile conflicting trends in observational data sets is required.

5.7 Hemispheric symmetry of the planetary albedo

The planetary albedo is the fraction of incoming solar radiation reflected by the Earth back to space. It is an important element of the radiative energy balance and influences whether the planet will warm or cool over time. The planetary albedo is typically estimated at around 0.30; variations on the scale of 0.01 correspond to changes in solar forcing of about 3 W/m^2 , an amount larger than current anthropogenic forcing. It has long been noted that models disagree with each other and with observations on the value of the global planetary albedo (Stephens *et al.* 2015).

An intriguing property of the Earth's albedo is that, on average, the Northern Hemisphere (NH) and Southern Hemisphere (SH) have had nearly the same albedo at least throughout the fifty-year satellite record (Stephens *et al.*, 2015). This symmetry is surprising, because the SH has much more ocean than land. Since ocean is less reflective than land, the NH should have higher albedo. Clouds (which are highly reflective) are more common in the NH and so compensate the surface albedo imbalances of the two hemispheres. Datseris and Stephens (2021) show that this cloud compensation comes from the extra-tropical storm tracks of the SH, which are cloudier than those of the NH. While the mechanism for this hemispheric symmetry is unclear, it likely operates on large temporal and spatial scales.

The hemispheric symmetry of the albedo is a simple gross metric for climate models. Rugenstein and Hakuba (2023) defined that metric as the difference between the NH and SH annual mean albedos, expressed as Wm^{-2} of the reflected sunlight, and compiled it for the CMIP6 climate models, as shown in Figure 5.9. Most of the CMIP6 models do not reproduce the small observed asymmetry (about 0.1 Wm^{-2}) and even disagree as to which hemisphere is more reflective. Moreover, the magnitude of the asymmetry ranges up to 5 Wm^{-2} in some models, twice as large as the current anthropogenic forcing (about 2.5 Wm^{-2}).

The significance of unphysical albedo asymmetries in the climate models is not yet fully known. However, other model studies suggest that interhemispheric changes in albedo can alter poleward heat fluxes, meridional temperature gradients, storminess, and differences in hemispheric ocean heat storage. The discrepancy between models and observations further raises issues regarding cloud feedback processes and so more generally diminishes confidence in model projections of the future climate.

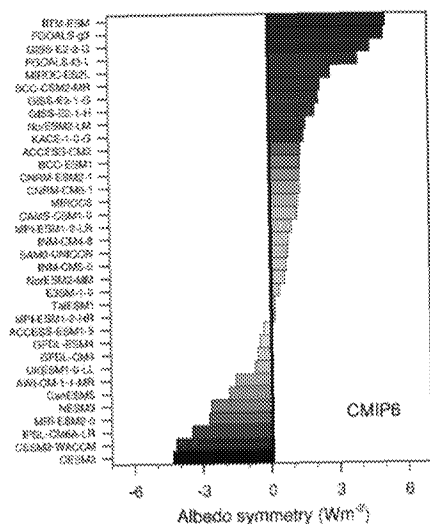


Figure 5.9. Differences in 20-year average reflectivity (albedo) between the Northern and Southern Hemispheres for CMIP6 models used in the most recent IPCC assessment (colored bars). The very small observed difference is indicated by the vertical black line. From Rugenstein and Hakuba (2023).

5.8 U.S. Corn Belt

One of the largest discrepancies between models and observations is in the U.S. Corn Belt, a region of particular importance to global food production. Figure 5.10 shows the warming trends for summertime (June, July, August) for the 12-state Corn Belt (IN, IA, IL, ND, SD, MO, MN, WI, MI, OH, KS, NE) during 1973-2022. All 36 climate models (red) warm far too rapidly compared to observations (blue).

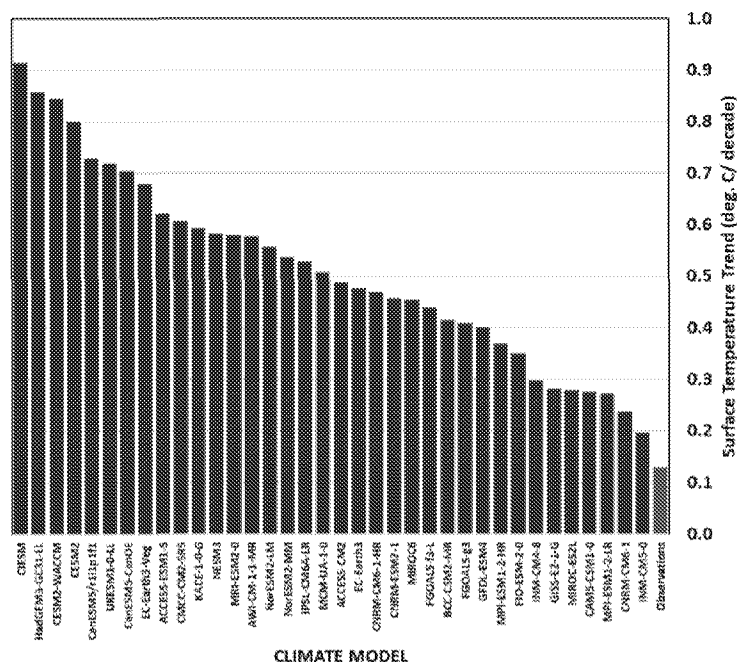


Figure 5.10: Modeled versus observed warming trends in the U.S. Corn Belt, 1973-2022.

As discussed in Chapter 9, the anticipated negative effects of increasing temperatures on U.S. corn yields have not materialized, in contrast to widely publicized studies proclaiming that theoretical future impacts are already being experienced (e.g. Seager *et al.*, 2018).

The IPCC acknowledges limitations in the accuracy of regional climate model outputs. This example shows that users need to assess model projections carefully on a case-by-case basis since local biases may be sufficiently large that the models are simply not fit for purpose. As has recently been noted by two leaders of the modeling community (emphasis added)

... for many key applications that require regional climate model output or for assessing large-scale changes from small scale processes, we believe that **the current generation of models is not fit for purpose.** (Palmer and Stevens 2019)

To summarize:

- Climate models show warming biases in many aspects of their reproduction of the past few decades
- They produce too much warming at the surface (except in the models with lowest ECS), too much warming in the lower-and mid-troposphere and too much amplification of warming aloft
- They also produce too much stratospheric cooling, too much snow loss, and too much warming in the Corn Belt.

- The hemispheric albedo difference in individual climate models ranges widely in sign and magnitude compared to observations. The range in W/m^2 is three times larger than the direct anthropogenic forcing of CO_2 .
- The IPCC has acknowledged some of these issues but not others.

References

- Christy, J. R., R. T. McNider (2017). Satellite bulk tropospheric temperatures as a metric for climate sensitivity. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 53, 511-518. [HYPERLINK "https://doi.org/10.1007/s13143-017-0070-z"]
- Christy, J. R. (2022). Time series construction of Oregon and Washington snowfall since 1890 and an update of California snowfall through 2020. *Journal of Hydrometeorology* 23, 1845-1860. [HYPERLINK "https://doi.org/10.1175/JHM-D-21-0178.1"]
- Connolly, R., M. Connolly, W. Soon, *et al.* (2019). Northern Hemisphere snow-cover trends (1967–2018): A comparison between climate models and observations. *Geosciences* 9, 135. [HYPERLINK "https://doi.org/10.3390/geosciences9030135"]
- Datseris, G., B. Stevens (2021). Earth's albedo and its symmetry. *AGU Advances* 2, e2021AV000440. [HYPERLINK "https://doi.org/10.1029/2021AV000440"]
- Karl, T.R., S. J. Hassol, C. D. Miller, W. L. Murray, eds. (2006). Temperature Trends in the Lower Atmosphere: Steps for Understanding and Reconciling Differences. U.S. Climate Change Science Program/Subcommittee on Global Change Research. [HYPERLINK "https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc12017/m2/1/high_res_d/sap1-1-final-all.pdf"]
- Klotzbach, P.J., R. A. Pielke, Sr., R. A. Pielke, Jr., J. R. Christy, R. T. McNider (2009). An alternative explanation for differential temperature trends at the surface and in the lower troposphere. *Journal of Geophysical Research — Atmospheres* 114(D21). [HYPERLINK "https://doi.org/10.1029/2009JD011841"]
- McKittrick, R. and J. R. Christy (2020). Pervasive warming bias in CMIP6 tropospheric layers. *Earth and Space Science* 7. [HYPERLINK "https://doi.org/10.1029/2020EA001281"]
- McKittrick, R., and J.R. Christy (2025), "Data and Code for DoE Report 2025", Mendeley Data, V1, doi: [10.17632/8n9ks93vn7.1](https://doi.org/10.17632/8n9ks93vn7.1)
- Palmer, T., and B. Stevens (2019). The scientific challenge of understanding and estimating climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(49), 24390–24395. [HYPERLINK "https://doi.org/10.1073/pnas.1906691116"]
- Philipona, R., C. Mears, M. Fujiwara, *et al.* (2018). Radiosondes show that after decades of cooling, the lower stratosphere is now warming. *Journal of Geophysical Research — Atmospheres* 123. [HYPERLINK "https://doi.org/10.1029/2018JD028901"]
- Rugenstein, M., and M. Hakuba (2023). Connecting hemispheric asymmetries of planetary albedo and surface temperature. *Geophysical Research Letters* 50, e2022GL101802. [HYPERLINK "https://doi.org/10.1029/2022GL101802"]
- Santer, B.D., P.W. Thorne, I. Haimberger *et al.* (2008) Consistency of modelled and observed temperature trends in the tropical troposphere *International Journal of Climatology* 28 1703–22 [HYPERLINK "https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.1756"]
- Scaffeta, N. (2023) CMIP6 GCM ensemble members versus global surface temperatures. *Climate Dynamics* 60, 3091–3120 (2023). [HYPERLINK "https://doi.org/10.1007/s00382-022-06493-w"]

Formatted: Font: Italic

Formatted: English (Canada)

- Seager, R., J. Feldman, N. Lis, *et al.* (2017). Whither the 100th meridian? The once and future physical and human geography of America's arid-humid divide. Part II: The meridian moves east. *Earth Interactions* 22. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1175/EI-D-17-0012.1>"]
- Spencer, R. W. (2024). Global warming: Observations vs. climate models. Environment Backgrounder, The Heritage Foundation.
[HYPERLINK "<https://www.heritage.org/environment/report/global-warming-observations-vs-climate-models>"]
- Stephens, G. L., D. O'Brien, P.J. Webster *et al.* (2015). The albedo of Earth. *Reviews of Geophysics*.
[HYPERLINK "<https://doi.org/10.1002/2014RG000449>"]
- Vogelsang, T. and N. Nawaz (2016). Estimation and inference of linear trend slope ratios with an application to global temperature data: *Journal of Time Series Analysis* 38. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1111/jtsa.12209>"]

6 EXTREME WEATHER

Chapter Summary

Most types of extreme weather exhibit no statistically significant long-term trends over the available historical record. While there has been an increase in hot days in the U.S. since the 1950s, a point emphasized by the IPCC AR6, numbers are still low relative to the 1920s and 1930s. Extreme convective storms, hurricanes, tornadoes, floods and droughts exhibit considerable natural variability but long-term increases are not detected. Some increases in extreme precipitation events can be detected in some regions over short intervals but the trends do not persist over long periods and at the regional scale. Wildfires are not more common in the U.S. than they were in the 1980s. Burned area increased from the 1960s to the early 2000's, however it is low compared to the estimated natural baseline level. U.S. wildfire activity is strongly affected by forest management practices.

6.1 Introduction

High impact weather extremes, usually related to temperature, precipitation and/or high wind, can disrupt infrastructure and therefore endanger human health and wellbeing. The issue is not whether extremes occur. Rather, it is whether there are long-term (decadal scale) changes in the frequency or character of extremes (“detection”), as well as the extent to which such changes and the attendant changes in hazards are caused by anthropogenic emissions of greenhouse gases (“attribution”; e.g., IPCC AR6 Seneviratne *et al.* 2021).

It is naïve to assume that any recent extreme event is caused by human influences on the climate. Climate is about the statistical properties of weather over decades, not single events. Further, there are only about 130 years of reliable observational records that can be analyzed statistically. That brief interval does not begin to contain all the extreme events that the climate system can create on its own. Over geologic time the climate system has generated an (essentially) infinite variety of weather patterns and extremes that humans have never observed and thus are absent from the databases used to determine extreme statistics [see *Perils of short data records* below]. For that reason, attributing an extreme event unprecedented in the record requires assumptions about the magnitude of natural variations.

This chapter is concerned with detection of trends in extreme weather, while Chapter 8 considers causal attribution, with Section 8.4 specifically addressing extreme weather. If no trend is detected, then clearly there is no basis for attribution. But even where a trend is observed, attribution to human-caused warming does not necessarily follow.

This is especially true for precipitation events. The hydrological literature has long noted the phenomenon of Long-Term Persistence (LTP) in rainfall data (Hurst 1951, Cohn and Lins 2005, Markonis and Koutsoyiannis 2016). LTP has a formal mathematical definition, but it can be thought of as the presence of natural variations with strong autocorrelations that result in cycle-like behavior on long time scales. The presence of LTP requires long records to accurately estimate variability. Analysis of records that are short relative to the LTP scale will tend to underestimate variability, therefore overstating the significance of apparent trends and underestimating the likelihood of extreme events (Cohn and Lins 2005).

Formatted: Font: Not Italic

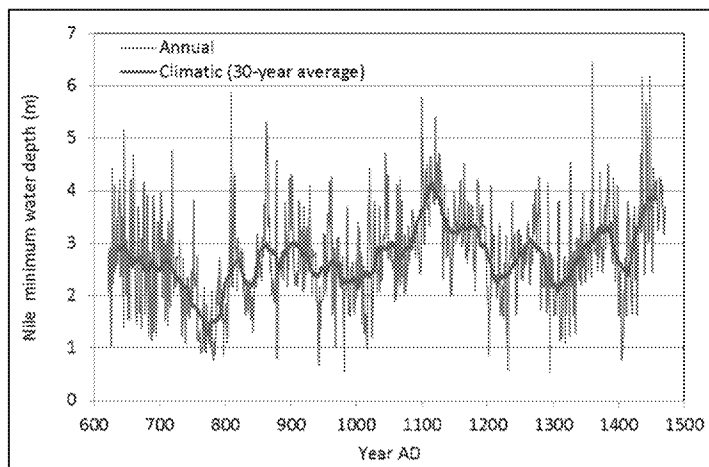


Figure 6.1.1: The annual minimum depth of the Nile River near Cairo over more than 650 years from 622 to 1284 A.D. The data, measured in meters, shows a characteristic pattern of year-to-year fluctuations around longer-term trends. Data from Koutsoyiannis (2013)

A good example of LTP is the eight-century long record of the annual minimum height of the Nile River observed at Roda Island in Cairo shown in Figure 6.1.1. The Nile River is fed by precipitation over a 4 million square mile drainage basin, an area equal to about one third of CONUS. Since human influences on the global climate were negligible before the 20th century, the century-scale variability of the thirty-year average is entirely natural; Egyptians of the seventh and eight centuries would have been incorrect to assume that the worsening drought during that time was the “new normal.”

With these caveats in mind, we examine the evidence for changes in selected weather and climate extremes. A recurring theme is the wide gap between public perceptions and scientific evidence. It has become routine in media coverage, government and private sector discussions, and even in some academic literature to make generalized assertions that extreme weather of all types is getting worse due to GHGs and “climate change.” Yet expert assessments typically have not drawn such sweeping conclusions and instead have emphasized the difficulty both of identifying specific trends and establishing a causal connection with anthropogenic forcing.

In the sections to follow we provide excerpts from various IPCC and NCA assessment reports denoting the sources as follows:

SREX: The IPCC Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (2012)

AR6: The IPCC Sixth Assessment Report Working Group 1 (2021).

NCA4: The U.S. Climate Science Special Report of the Fourth National Climate Assessment (2017) Volume I.

NCA5: The U.S. Climate Science Special Report of the Fifth National Climate Assessment (2023) Volume I.

In the excerpts, *italics* are in the original whereas **boldface** emphasis has been added.

OUO – Official Use Only

Additionally we present updated data series from standard government sources to provide up-to-date information through 2024 wherever possible.

6.2 Hurricanes and tropical cyclones

The AR6 provides the following assessment of tropical cyclones (TCs; used here as a synonym for hurricanes):

AR6: There is *low confidence* in most reported long-term (multidecadal to centennial) trends in TC frequency or intensity-based metrics due to changes in the technology used to collect the best-track data. (IPCC, 2021 p. 1585)

AR6: It is *likely* that the global proportion of major (Category 3–5) tropical cyclone occurrence has increased over the last four decades . . . There is *low confidence* in long-term (multi-decadal to centennial) trends in the frequency of all-category tropical cyclones. (IPCC, 2023 SPM p. 9)

AR6: A subset of the best-track data corresponding to hurricanes that have directly impacted the United States since 1900 is considered to be reliable, and shows **no trend in the frequency of U.S. landfall events**. (IPCC 2021 p. 1585)

Since 1980, when satellite observations fully covered the global oceans, we have confidence in the numbers of total global hurricanes and major hurricanes (Category 3 and higher). Figure 6.2.1 shows that on average, each year there are about 50 hurricanes, with about 25 reaching major hurricane status (Maue, 2025). There is substantial year-to-year and decadal variability, a weak decrease in the number of hurricanes, and a slight but insignificant increase in the number of major hurricanes. These two trends combine to create an overall increase in the proportion of major hurricanes.

Global hurricane statistics are dominated by the Northwest Pacific Ocean, which accounts for ~35 percent of total global hurricanes, whereas the Atlantic accounts for ~15 percent of global hurricanes (Colorado State University, 2025). Data in the Atlantic basin extends further back than in the other ocean basins and is most relevant to U.S. policy makers.

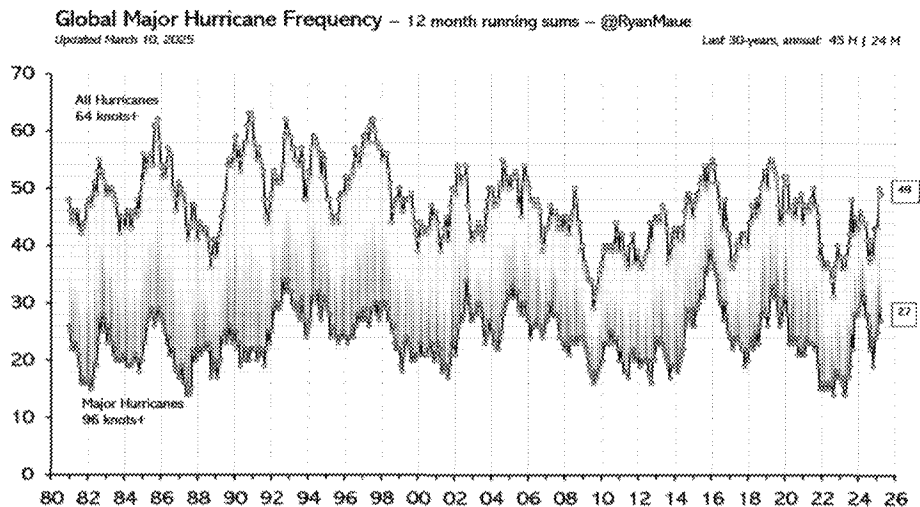


Figure 6.2.1: Global frequency of hurricanes and major hurricanes since 1980.

Figure 6.2.2 shows the frequency of Atlantic hurricanes and major hurricanes (Category 3 and higher) back to 1920. Data prior to 1965 (the onset of satellite observations in the Atlantic, shaded in blue) shows some undercounting, with data prior to 1920 showing substantial undercounting (Vecchi and Knutson, 2011). All measures of Atlantic hurricane activity show a significant increase since 1970. However, the period from 1971-1994 saw exceptionally low activity, with high activity (comparable to the past two decades, even with undercounting) also observed during the 1950's and 1960's, and even in the 1930's.

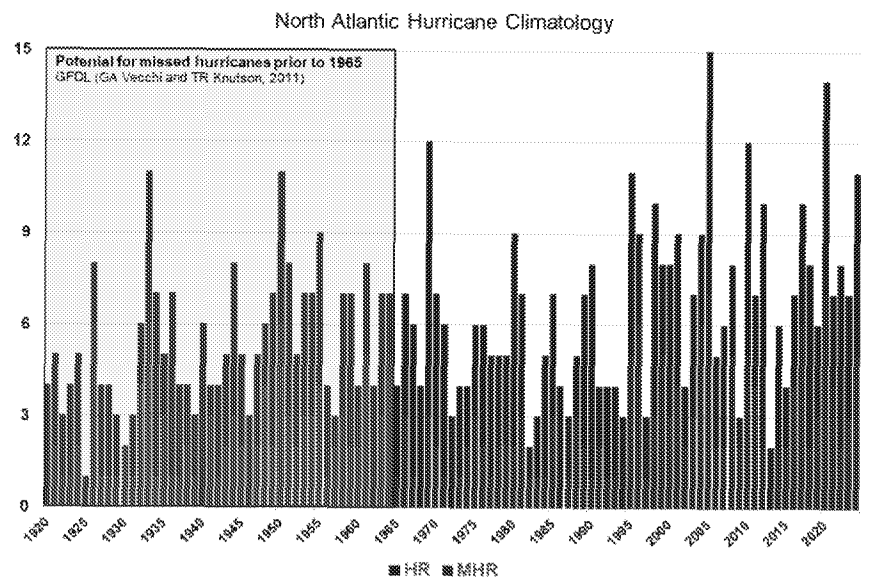


Figure 6.2.2: Atlantic frequency of hurricanes (HR) and major hurricanes (MHR) since 1920. Source: National Hurricane Center (2024)

Figure 6.2.2 shows that Atlantic hurricanes vary strongly on decadal and multidecadal time scales. These variations are associated primarily with the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO), which is manifest in basin-wide sea surface temperature and sea level pressure fluctuations connected to large scale ocean circulation patterns. The AMO was in its warm phase during 1926-1970 and 1995-present, but in its cool phase during 1971-1994. It has its greatest impact on the number of major hurricanes (Category 3+), identified by Goldenberg et al. (2001) as associated with above normal SSTs and decreased vertical shear in the AMO warm phase (see also Bell and Chelliah, 2006; Klotzbach et al., 2018).

Klotzbach et al. (2018) conducted a comprehensive evaluation of the landfalling hurricane data for the Continental U.S. since 1900. Figure 6.2.3 updates their analysis through 2024. While the largest numbers of landfalling hurricanes are from 2004, 2005 and 2020, there is no statistically significant trend since 1920. Figure 6.2.3 also shows the time series for major hurricane landfalls (Category 3-5). The largest year in the record is 2005, with 4 major hurricane landfalls. However, following 2005 there were no major hurricanes striking the U.S. from 2006 through 2016, the longest such period since 1920.

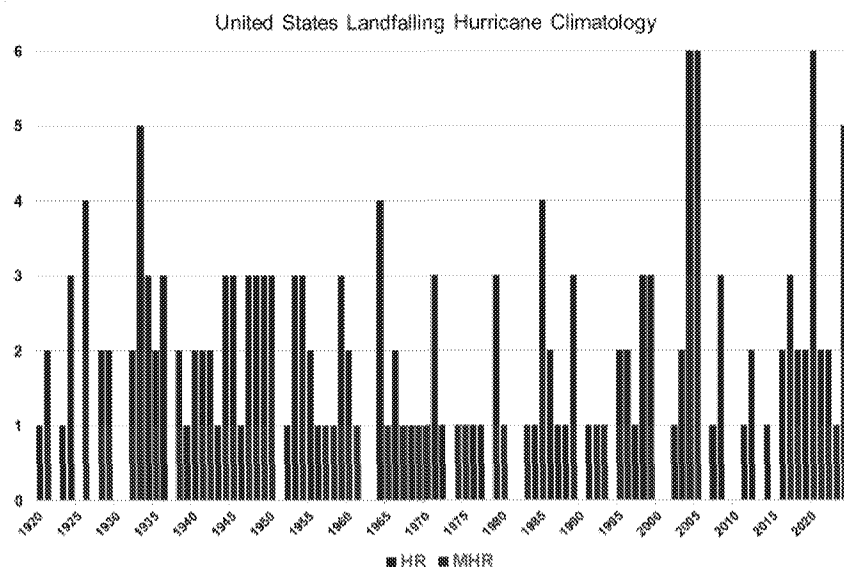


Figure 6.2.3: U.S. landfalling frequency of hurricanes (HR) and major hurricanes (MHR) since 1920. Source NOAA HRD(a) (2024)

Figure 6.2.3 shows substantial interannual to multidecadal variability in U.S. landfall activity. Klotzbach et al. (2018) examined how the landfall counts vary with ENSO (El Niño versus La Niña) and the warm versus cold phases of the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO).

Villarini et al. (2012) provide an analysis of U.S. hurricane landfalls back to 1878. While it is possible that some landfalls were missed in the late 19th century owing to sparsely populated regions on the Gulf Coast, it is remarkable that the highest year in the entire record is 1886, with 7 hurricane landfalls, when human influences on the climate were much smaller than they are today.

Table 6.2.1 shows the 10 strongest hurricanes (plus ties) to make U.S. landfall. Of the hurricanes that have made landfall with sustained winds greater than 150 mph, only one has occurred in the 21st century.

In summary, analyses of both global and regional variability and trends of hurricane activity provide the basis for detecting changes and understanding their causes. The relatively short historical record of hurricane activity, and the even shorter record from the satellite era, is not sufficient to assess whether recent hurricane activity is unusual relative to the background natural variability. Atlantic hurricane processes are influenced substantially by the natural modes of ocean circulation variability in the Atlantic, notably the Atlantic Multidecadal Oscillation. While it has long been hypothesized that a rising global sea surface temperature would cause an increase in hurricane intensity, identification of any significant trend in the hurricane data is hampered by a short data record and substantial natural variability.

Rank	Year	Landfall Wind (MPH)	Name
1	1935	185	"Labor Day"
2	1969	175	Camille
3	1992	165	Andrew
4	2018	160	Michael
5	1856	150	"Last Island"
5	1886	150	"Indianola"
5	1919	150	-----
5	1932	150	"Freeport"
5	2004	150	Charley
5	2020	150	Laura
5	2021	150	Ida
5	2022	150	Ian

Table 6.2.1 Strongest hurricanes to make landfall along the U.S. coast. Source (NOAA HRD(b), 2024)

6.3 Temperature extremes

The AR6 assessment focused on the period after 1950 and reported increasing trends in heatwave frequency and intensity. However, the NCA4 noted that heatwave activity in the U.S. reached a peak in the 1930s (Figure 6.3.1).

AR6: It is *virtually certain* that hot extremes (including heatwaves) have become more frequent and more intense across most land regions since the 1950s, while cold extremes (including cold waves) have become less frequent and less severe (SPM, A3.1)

AR6: In North America, there is very robust evidence for a *very likely* increase in the intensity and frequency of hot extremes and decrease in the intensity and frequency of cold extremes for the whole continent, though there are substantial spatial and seasonal variations in the trends. Minimum temperatures display warming consistently across the continent, while there are more contrasting trends in the annual maximum daily temperatures in parts of the USA. (Chapter 11, p 1550)

NCA4: Changes in warm extremes are more nuanced than changes in cold extremes. For instance, the warmest daily temperature of the year **increased** in some parts of the West over the past century, but there were **decreases** in almost all locations east of the Rocky Mountains. In fact, all eastern regions experienced a net **decrease**, most notably the Midwest (about 2.2°F [1.2°C]) and the Southeast (roughly 1.5°F [0.8°C]). (pp. 190-191)

NCA4: Since the mid-1960s, there has been only a very slight increase in the warmest daily temperature of the year (amidst large interannual variability). Heat waves (6-day periods with a maximum temperature above the 90th percentile for 1961–1990) increased in frequency until the mid-1930s, became considerably less common through the mid-1960s, and increased in frequency again thereafter. As with warm daily temperatures, **heat wave magnitude reached a maximum in the 1930s.** (pp. 190-191)

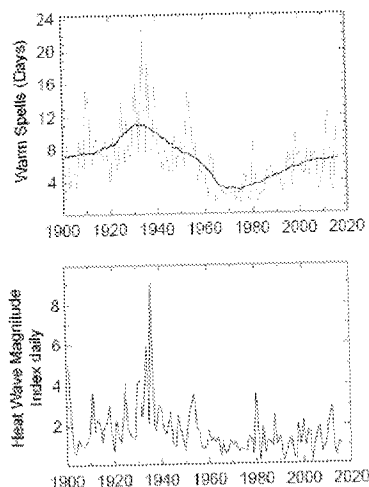


Figure 6.3.1: U.S. Heat waves since 1900. Source: NCA4 Figure 6.4

6.3.1 Temperatures in the U.S. are becoming less extreme

Daily maximum temperatures in the warm season (T max, May-Sep) and daily minimum temperatures in the cold season (T min, Dec-Mar) are available beginning in Dec 1898 (126 years). The dataset consists of 1,211 CONU.S. stations designated as United States Historical Climate Network or USHCN stations (see Figure 6.3.2; Quinlan *et al.* 1987, Karl *et al.* 1990). These stations were selected by NOAA as having the fewest problematic issues with gaps, station moves and instrument changes. Where gaps still exist, nearby stations (bias-corrected) were merged so that the median volume of data available for a station is 98%. Although there are certainly errors in the dataset, including unresolved spurious warming due to UHI effects that especially bias T min records, this data set is sufficiently accurate for assessing trends in T max heat extremes.

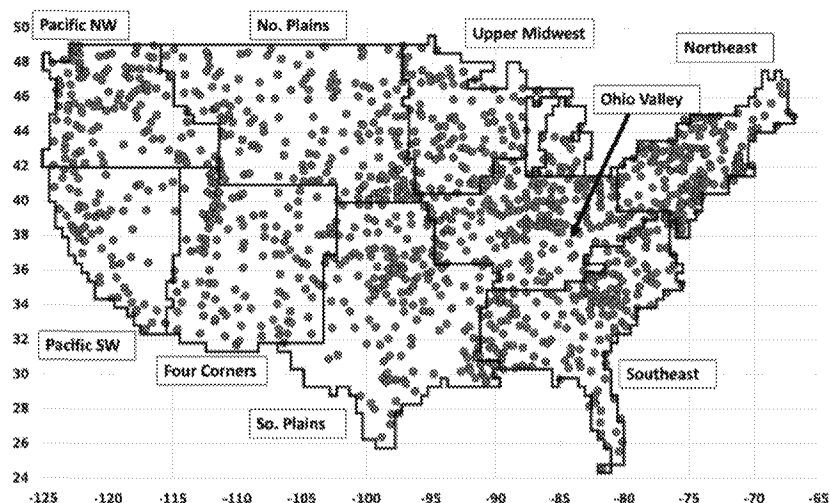


Figure 6.3.2 Locations of USHCN temperature stations. Source: USHCN.

We begin with the question of whether the occurrence of daily record high or low temperatures has changed since Dec 1898. Each warm-season has 153 days (1 May to 30 Sep) and each cold-season has 122 days (1 Dec to 31 Mar). For each station and day, we calculated the year in which the record highest (lowest) temperature occurred. With 126 years of observations, if there were no temperature trends over time, the expected number of records for Tmax would be 1.21 ($=153/126$) per station per year and for Tmin 0.96 ($=122/126$) per station per year.

Figure 6.3.3 shows the observed distribution in time of the occurrence of these extreme events. There is a common feature in many metrics of warm-season extremes in the CONUS - the exceptional heat of the 1920s and especially the 1930s, peaking in 1936. On a per-station average, 60 percent of the Tmax records and 59 percent of the Tmin records occurred in the first half of the period (1899-1961).

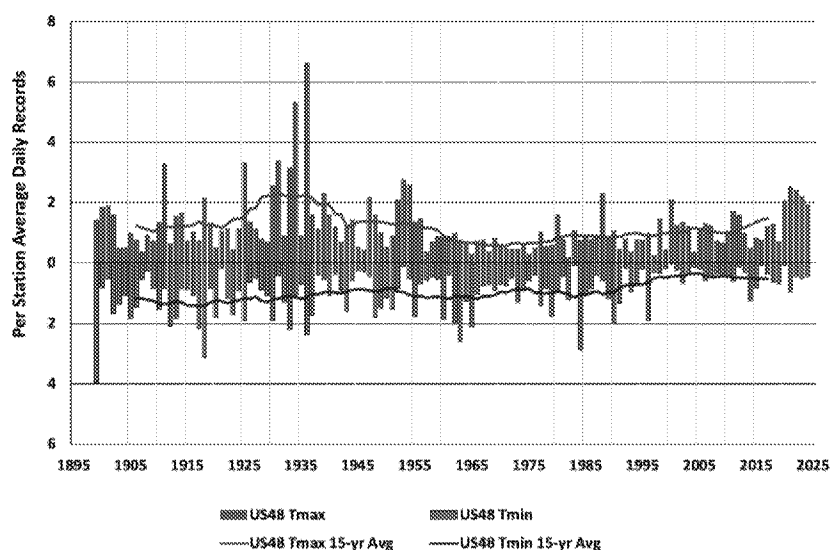


Figure 6.3.3 Number of daily record High (red) and Low (blue) temperatures for warm and cold seasons in the CONUS. The lines represent the 15-year running, centered average. Source: 1,211 USHCN stations supplemented as needed to achieve a minimum of 92 percent of observations in the 126-year period since Dec 1898. US48: contiguous U.S. states. Tmax: maximum temperature. Tmin: minimum temperature.

On the cold side, the Valentine's Day Arctic outbreak in Feb 1899 stands as the most extensive cold extreme experienced by CONUS, with 1917 in 2nd place. The frequency of cold records has declined, especially over the last quarter of the period in which only 13 percent of the extreme cold events were measured. In contrast, 25 percent of the extreme Tmax records were achieved in the last quarter, in accordance with statistical expectations. These general features have been noted in past assessments (see above, IPCC AR6, NCA4). Combining the two records the overall reduction in numbers of both cold and hot extremes over the past century indicates a climate less prone to extremes.

This pattern is also shown in Figure 6.3.4. For each station and for each year the hottest warm season and coldest cold-season temperatures were calculated. Then the differences between these were computed by station and geographically-averaged over all stations, thus yielding an annual measure of the expected range of local extreme temperatures for each year. Figure 6.3.4 shows the 15-year trailing average of this measure, which has clearly declined over the past century.

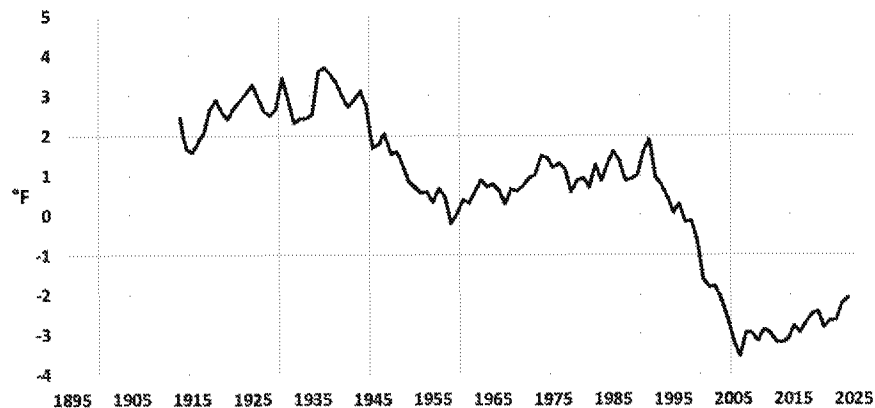


Figure 6.3.4. 15-year trailing average of the difference each year of each station's hottest warm-season Tmax and coldest cold-season Tmin relative to the long-term average. Source: Author analysis of USHCN data.

The average difference for each station between the hottest summer Tmax and coldest winter Tmin has declined by about 5°F in the past 126 years. The decline is due mostly to warmer winter Tmin, but a decline in summer Tmax is also a factor. The rise in Tmin has been strongly related to the growing presence of manufactured surfaces around the weather stations over the last 100+ years (the so-called urban heat island effect; Spencer *et al.* 2025).

In summary, while temperature extremes are regularly experienced in the U.S. and attract a great deal of media attention, long term records show the U.S. climate has become less extreme over time (milder) when measured by the range between warm season maxima and cold season minima.

6.3.2 Exceedances of a heat threshold

Under the heading of “The Risk of Temperature Extremes is Changing”, the most recent U.S. National Climate Assessment report (NCA5) notes the increase in a threshold metric of number of days at or above 95°F, stating,

The western U.S. has been particularly affected by extreme heat since the 1980s ..., experiencing a larger increase in days over 95°F, as would be expected given the greater warming in that region relative to the eastern US. Several major heatwaves have affected the U.S. since 2018, including a record-shattering event in the Pacific Northwest in 2021.

Are the occurrences of 95°F days changing? In a climate as varied as that of CONUS, threshold statistics can be misleading. A region with many stations that have near 95°F Tmax average temperatures in the summer might see large swings in the metric when only small changes in average temperature occur. Elsewhere with stations that either rarely or virtually always achieve 95°F Tmax temperatures, a small change will not have much impact on the results.

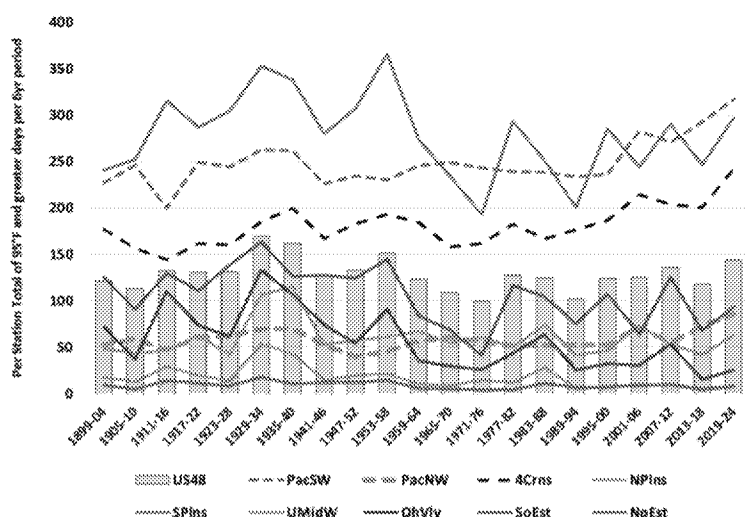


Figure 6.3.5. Total number of days $\geq 95^{\circ}\text{F}$ in 6-yr periods, U.S. 48 (bars) and regions (lines). A 6-year period is used as this evenly divides the 126-year record. US48: contiguous U.S. states. See Figure 6.3.2 for region names. Source: Author analysis of USHCN data.

In the past 126 years, the average CONUS station experienced 129 days exceeding 95°C per 6-yr period, but the regional values range from 278 in the Southern Plains to 9 in the Northeast. Thus, such threshold analyses must be interpreted with caution. Figure 6.3.5 shows that only three of the nine regions, all in the West, have experienced upward trends in the number of 95°F or hotter days (dashed lines). The CONUS as a whole has not, and the other six regions have experienced declines.

The Pacific NW heatwave of 2021 referenced in the NCA5 quote will be examined more closely in Section 8.6.1. The evidence indicates that it was a single, unprecedented event in the record, not part of a pattern of increasing extreme heat. For example, the 5-day average tropospheric grid-point temperature anomaly over the Pacific NW during that event was $+10.8^{\circ}\text{C}$, the most extreme Northern Hemisphere grid point summer anomaly in the 46 years from over 4 million grid values. In contrast, the global temperature anomaly during that time was virtually zero ($+0.03^{\circ}\text{C}$, Mass *et al.* 2024).

The NCA5 heading “The Risk of Temperature Extremes is Changing” suggests pervasive positive trends are now being observed in threshold temperatures, but that is not evident in the figures above.

6.3.3 Heatwaves

Heatwaves (consecutive days that exceed an extreme threshold) have a greater societal impact than a single daily record temperature. We measure “Heatwave Days” here as the count of all days in May-Sep each year that exceed the 90th percentile for that day and that lie within a period of at least six consecutive days. This is equivalent to the method used in NCA4, except that the reference period here is the entire record 1899-2024 while NCA4 truncated the reference period to 1961-1990, which was a cool period. That truncation boosts positive results (days exceeding the 90th percentile) in periods warmer than the reference period, especially starting in 1960 and moving to the present (see Figure 6.3.7 and discussion below).

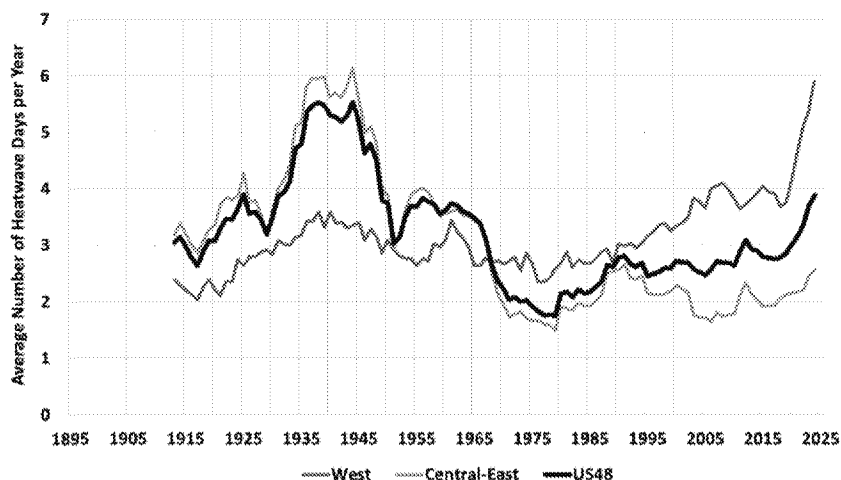


Figure 6.3.6 15-year trailing average of number of heatwave days per year per station in the CONUS (blackline) and two regions: West (red), Central-east (green).

Figure 6.3.6 indicates that there are regional variations in heatwave activity. The excessive heat of the first half of the 20th century occurred primarily in the eastern two-thirds of the nation, while the West has seen a recent increase of heatwave days (NCA5). This indicates that the background warm season circulation favored heatwaves in the eastern portions of the country in the first half of the 20th century, but in the 21st century the patterns have favored heatwaves in the West. For CONUS as a whole, heatwaves are no more common today than they were a century ago, consistent with the upper panel of our Figure 6.4.1 taken from NCA4.

This metric varies significantly with region. The four northern regions (Pacific NW, Northern Plains, Upper Midwest, and Northeast) on average experience 15 to 27 heatwave days per 15-year period. In contrast, the five southern regions (Pacific Southwest, 4-Corners, Southern Plains, Ohio Valley and Southeast) see 37 to 54 such days, essentially twice as many. This suggests the summer circulation pattern is more prone to stationary events in the southern regions while transient systems in the northern regions are more common and thus cut short these potentially longer events.

The analysis of heatwaves is an example of why it is important to consider complete datasets and appropriate metrics. The NCA5 directs readers to the website [[HYPERLINK "https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves"](https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves)] (USGCRP 2023) to view a figure showing the number of urban heatwaves by decade from the 1960s, which we reproduce as Figure 6.3.7.

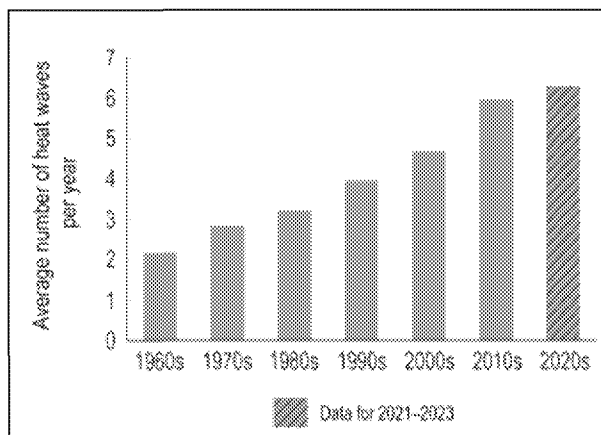


Figure 6.3.7: Average number of urban heatwaves per year for 50 large U.S. metropolitan areas, a misleading metric for reasons explained in the text. From [[HYPERLINK "https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves"](https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves)]

The figure shows a monotonic increase in each decade from 2 occurrences per year in the 1960s to 6 in the 2020s. The definition of a heatwave used is an unusual but practical measure of human discomfort - a period of at least 2 consecutive days when the *minimum* apparent temperature (combination of temperature and humidity) exceeds the 85th percentile. Note too, the dataset is limited to the 50 largest U.S. cities.

Given the unusual heatwave definition and urban focus, these increasing values since 1960 presented in USGCRP (2023) are not informative about long term trends or the influence of GHG emissions for at least two reasons. First, as shown in Figures 6.3.1 and 6.3.6, the 1960s was the coldest decade and 1970s the second coldest decade since the 1910's, so this starting date preconditions the time series to show increases. Second, post-1960 urbanization in these cities is a major factor in the rise of T_{min} relative to co-located T_{max} and relative to T_{min} at nearby rural stations. This does not dismiss the real rise in nighttime temperatures in major U. S. cities and the societal impacts associated with these changes. However, we note for a variety of reasons, that summer T_{max} (especially in rural areas) is a better metric for detecting changes in heatwaves influenced by changes in the background climate due, for example, to increasing GHGs (Christy *et al.* 2009). For the CONUS as a whole, the evidence in this section suggests GHG emissions have had little-to-no effect on heatwaves.

6.4 Extreme precipitation

The IPCC AR6 assessed that an increase in heavy precipitation has been observed in data starting in the 1950s.

AR6: The frequency and intensity of **heavy precipitation events have increased** since the 1950s over most land area for which observational data are sufficient for trend analysis (high confidence). (SPM A3.2)

AR6: In North America, there is robust evidence that the **magnitude and intensity of extreme precipitation has very likely increased** since the 1950s. Both [one-day maxima] and [5-day maxima] have significantly increased in North America during 1950-2018. (Chapter 11, p. 1560)

The U.S. National Climate Assessments (NCA4, NCA5) have highlighted an increase in the occurrence of the heaviest precipitation events (defined in different ways) primarily in the eastern half of the CONUS, especially the Northeast, when starting the analysis in either 1901 or 1958. Interestingly, the regional variations indicate that the largest increases in extreme precipitation events are in the Northeast and the smallest in the West, a pattern counter to the changes in temperature extremes.

McKittrick and Christy (2019) examined long-term and consistent station observations of extreme daily precipitation to test some of these NCA claims for the Southeast and West Coast using a trend model with a non-parametric variance estimator robust to the complex autocorrelation properties of precipitation data. When the time series were extended back in time (as far as 1872 in some cases) or when starting later (1978), there were no significant trends for either region.

These findings have been updated for this report (McKittrick and Christy 2025) with similarly constructed observations from 29 stations on the CONUS Pacific Coast (1893ff from San Diego CA to Blaine WA) and 24 stations in the humid Southeast (1872ff from Austin TX to Washington DC), also adding 27 stations in the Northeast (1888ff from Buffalo NY to Eastport ME). The locations are shown in Figure 6.4.1. The stations were selected based on availability of long-term high-quality records. The regions are each associated with important features of extreme precipitation behavior: the Pacific coast is associated with landfalling atmospheric rivers for which AR6 cites evidence of increasing activity since 1948 with further increases expected as the world warms (AR6 8.3.2.8.2); the NCA report indicates that the Northeast has experienced the greatest increase in extreme events, and the Southeast is also a place noted in the NCAs as having increased extreme events.

The results of applying the analysis of McKittrick and Christy (2019) were as follows for each region, then followed by further explanation.

Pacific Coast heavy rainfall events

- The average precipitation trend is statistically significant (downwards) in Astoria OR; insignificant elsewhere.
- The trend in rainfall variance is positive and significant in Big Sur CA; insignificant elsewhere.
- The trend in daily maximum precipitation is positive and significant in Aberdeen WA and Big Sur CA and negative and significant in Newport OR (insignificant elsewhere).
- Averaged over all stations in the region, none of these three trend parameters is statistically significant.

The Pacific Coast receives considerable precipitation from Atmospheric River (AR) events which often last more than a day or two (e.g., Gershunov *et al.* 2017, Pan *et al.* 2024). The worst series of such events in recent history was the so-called ARkStorm that occurred between December 1861 and January 1862; it dumped nearly 10 feet of rain in parts of California and submerged the entire Central Valley for weeks under as much as 15 feet of water (Brewer 1930, Null and Hulbert 2007). Additionally, Paleoclimate research has found six megastorms more severe than 1861–1862 in California during the last 1800 years, occurring at intervals of 300 years or so (Porter *et al.* 2011).

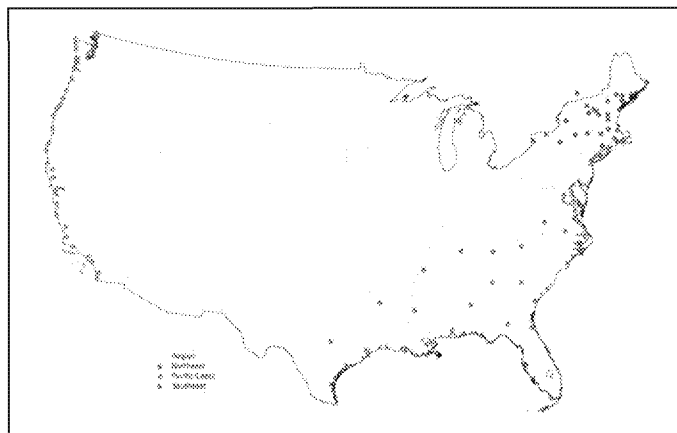


Figure 6.4.1: Locations of precipitation monitoring stations used in this report. Orange: Pacific coast. Blue: Northeast. Green: Southeast. Data from McKittrick and Christy (2025).

We examine occurrences of 5-day deluges as follows. Taking the Pacific coast as an example, a 130-year span contains 26 5-year intervals. At each location we computed the 5-day precipitation totals throughout the year and selected the 26 highest values across the sample. A single year may have more than one of the 26 heaviest. Each of those can be thought of as 1-in-5yr events. If there are no trends in precipitation, then the total number of these events across all stations should be evenly spread out over the years. In Fig. 6.4.2 we show the distribution in time of these events for the Pacific coast. The deluges associated with the massive 1997-98 El Niño event are readily apparent. While erratic, as is typical of such precipitation metrics, there is no indication of a tendency to become more frequent over time.

Southeast heavy rainfall events

- The trend in average precipitation is positive and statistically significant in Mobile AL and Quitman GA but insignificant elsewhere.
- The trend in rainfall variance is positive and significant in Mobile AL but insignificant elsewhere.
- The trend in daily maximum precipitation is positive and significant in Vicksburg MS and Norfolk VA but insignificant elsewhere.
- Averaged over all stations in the region none of these three trend parameters is statistically significant

Figure 6.4.3 shows the same calculation for the last 150 years in the Southeast humid zone. The temporal pattern of 5-day totals of the 1-in-5yr heavy events is generally unremarkable, though a cluster of higher values appears in 1995 to 2019. The increase in those years is due largely to the 4 northeastern-most stations of Wilmington NC, Weldon NC, Washington DC, and Norfolk VA. This confirms the pattern indicated in NCA4 and NCA5 -- an increasing frequency of heavy events due to a temporal clustering of tropical storms from eastern NC to Maine discussed below. Otherwise, the remaining 20 stations show an unremarkable temporal distribution of heavy events.

BOX: Perils of short data records

San Francisco provides a good case study of the limitation of using short historical samples to characterize natural variability of extreme events. Suppose we use a 130-year sample of daily San Francisco precipitation from 1895 to 2024 and we look for 3-day, 5-day, 14-day and 30-day rainfall records. The results are as shown in Table 7.2.

Event	Record (inches)	Year
3-day	6.94	2023
5-day	8.55	2023
14-day	12.62	2023
30-day	18.93	1998

Table 6.2: Extreme rainfall records, San Francisco, 1895-2024.

The records all cluster in the more recent years. 2023 appears to be an exceptional year and since it is near the end of the sample, it might suggest that the climate has shifted into a more hazardous state, perhaps because of human influences. Note: “2023” indicates the event occurred in the water-year of Aug 2022 to Jul 2023.

But the picture is very different if we use a sample that begins 45 years earlier, in 1850. Table 6.3 shows that the record-setting events all happened in the 1860s. Furthermore 2023 is now not even in 2nd place but falls to 3rd or 4th place. And comparing the records of the two charts shows the extreme precipitation events in 1862 and 1867 involved considerably more rainfall than the 1998 and 2023 events, with 14- and 30-day totals about 50 percent higher.

Event	Record (inches)	Year	Rank of 130-yr extreme listed in Table 6.2
3-day	8.85	1867	3
5-day	9.80	1867	3
14-day	19.05	1862	4
30-day	28.25	1862	2

Table 6.3: Extreme rainfall records, San Francisco, 1850-2024.

The range of natural variability is made even more remarkable when paleoclimate evidence is examined. Porter et al. (2011) discovered that in the past 1,800 years at least six megastorms were more intense than the devastating 1861-62 ARkStorm that struck the region. Evidently such extreme events, “unprecedented” in our 1895-2024 sample, have impacted the region about every 300 years, though not since 1895.

This example illustrates the limitations of using relatively short climate periods (~130 years) to assess the character and range of natural variability in general and of extreme events in particular. Accurate representation of the full range of natural variability is necessary for any attribution analyses (see 8.6). Infrastructure planners, emergency management institutions and attribution scientists would understand the significant mischaracterization of the magnitude of a future extreme if based only on the last 130 years. In this case, a single time-sample of 130 years provides an underestimation of the extreme value by up to 50 percent determined when adding only 45 more years of observations. Compared to millennial-scale paleoclimate evidence, an even greater underestimation would occur. An important lesson is that the climate can deliver great surprises on its own, even without human influences.

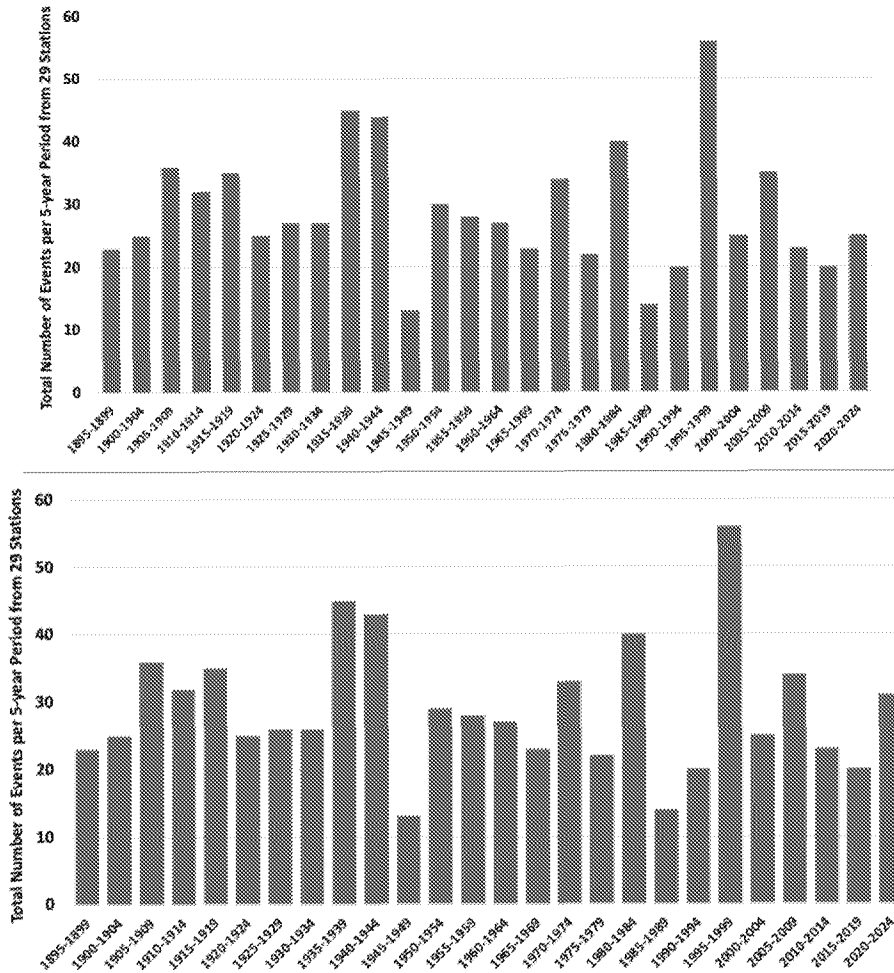


Figure 6.4.2. The time distribution by 5-year periods of the 26 heaviest (1-in-5 yr) occurrences for 29 stations on the Pacific coast.

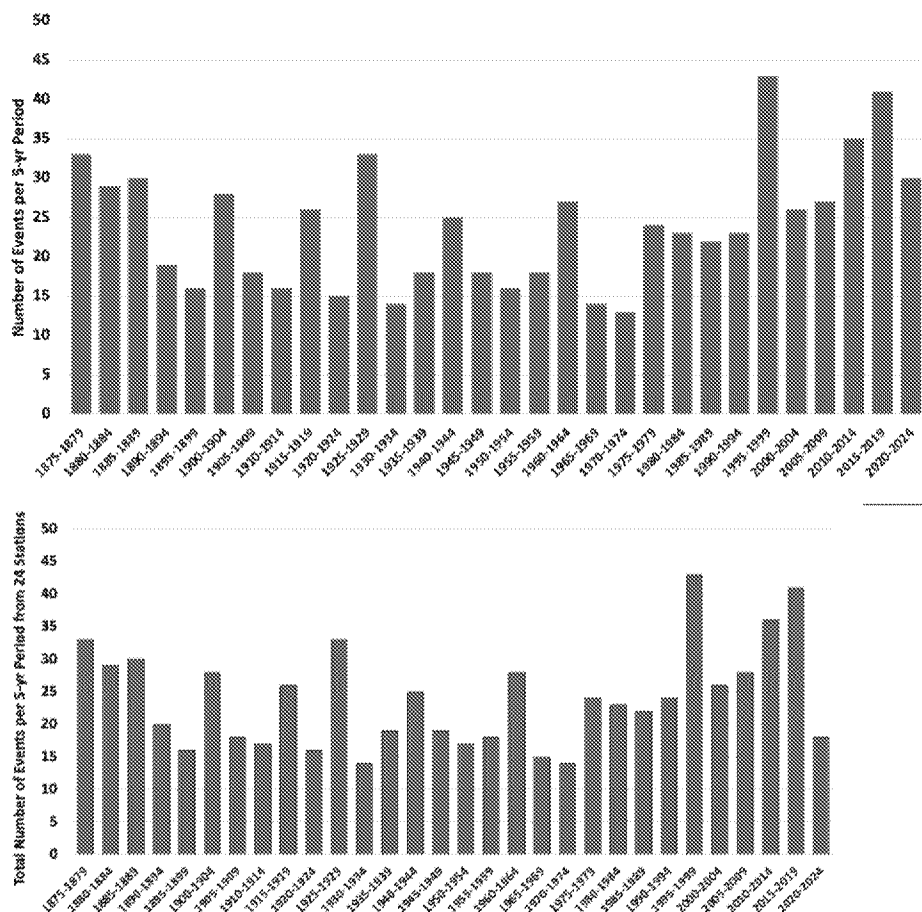
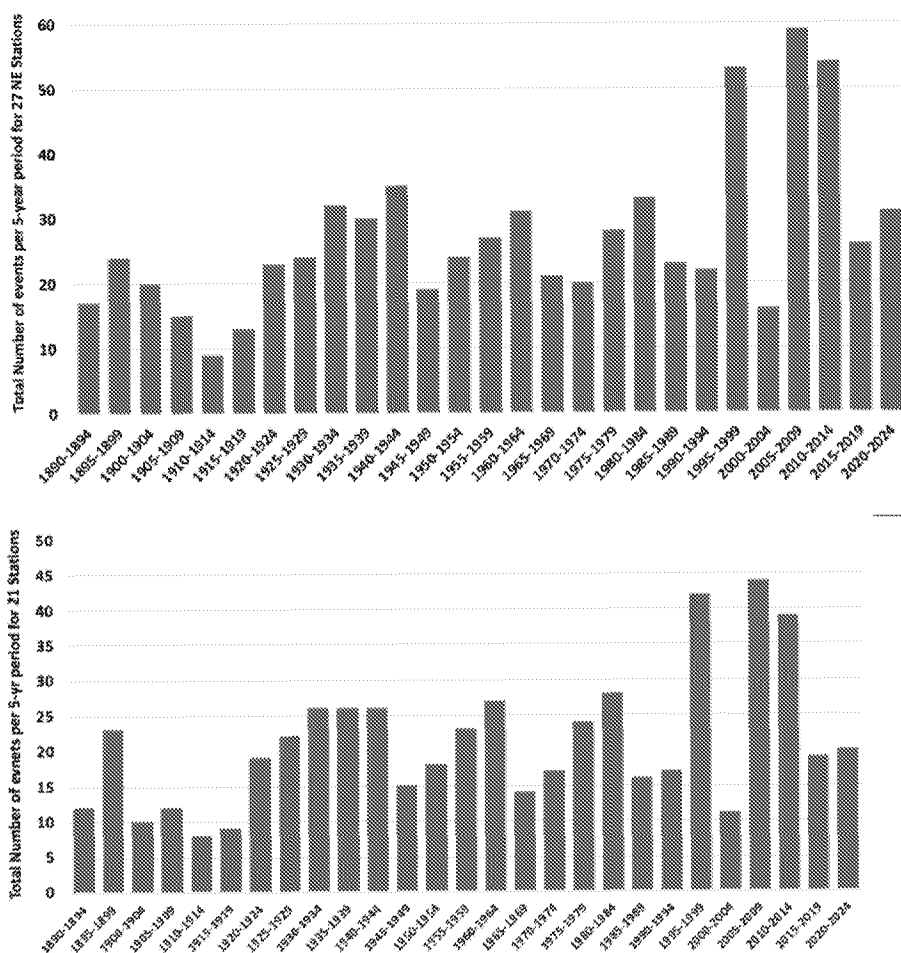


Figure 6.4.3. As in Fig. 6.4.2 but for the heaviest 30 (1-in-5-yr) events for 24 stations in the humid Southeast from Austin TX to Washington DC in 5-year bins for 1875-2024.



Formatted: Indent: First line: 0"

Figure 6.4.4. As in Fig. 6.4.2 but for the heaviest 27 (1-in-5yr) 3-day precipitation events for 27 Northeast stations from NY to ME, including Montreal.

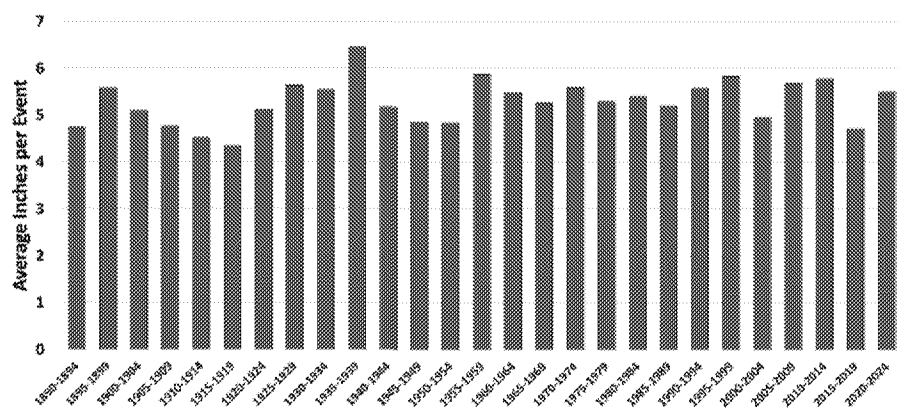
Northeast heavy rainfall events

- The trend in average precipitation is positive and statistically significant in 12 of 27 locations and also in the regional average.
- The trend in rainfall variance is positive and significant in Portland ME, Albany NY, Buffalo NY and Eastport ME but insignificant elsewhere.
- The trend in daily maximum precipitation is positive and significant in Portland ME, Gardiner ME and Eastport ME but insignificant elsewhere.

- When averaged over all stations in the region, there is no statistically significant trend in either the precipitation variance or maximum

Fig. 6.4.4 shows the same calculation for the last 135 years in 27 stations in the Northeast (including Montreal Canada). We use 3-day totals here as this produced the largest temporal variations in time. In this region, 77± percent of events occur during June to October and are dominated by incursions of hurricanes, tropical storms, or tropical storms that transition to extratropical systems. According to NCA4 and NCA5 this region experienced the largest increases in extreme events, so it merits a closer examination.

There is a noticeable clustering of extreme events from 1995 to 2014. Howarth et al. (2019) examined a similar region as in Fig. 6.5.5 that includes PA and NJ and reported significant differences in various precipitation extremes between two 18-year periods, 1979-96 and 1997-2014. That included a 317 percent increase in 24-hr events exceeding 6 inches, while we find a 58± percent increase over the same years. However, Figure 6.5.5 shows that frequency drops sharply after 2014, returning to the long-term average in the subsequent 5-year intervals, again illustrating the perils of drawing conclusions from short-term trends in highly variable metrics.



Formatted: Indent: First line: 0"

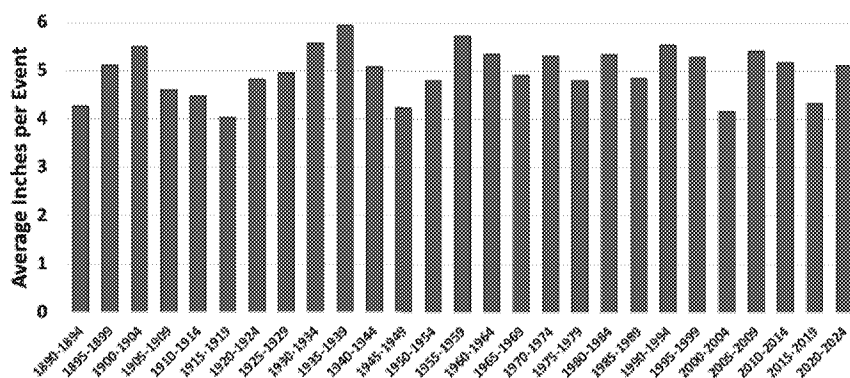


Figure 6.4.5. Average amount of precipitation falling in the 1-in-5yr events for the NE stations.

The high percentage increase in the Howarth *et al.* sample is associated with small numbers at relatively few locations: there were only 6 in the first period and 25 in the second across 58 stations. Most of the stations did not record such an event. If there is a region-wide increase in heavy events, it should be seen in the average across all stations. Figure 6.4.5 shows the average precipitation in the 1-in-5 yr events across the NE. The trend is only $+0.04 \pm 0.02$ inches/decade. The highest amount, 1935-39, includes the Great New England Hurricane of 1938, one of the rare major (Category 3 or higher) hurricanes to strike the region. The results in Figs. 6.4.4 and 6.4.5 thus suggest that though there was a surge in the number of events at a few locations during the 1995 to 2014 interval, there was no regional pattern and the change did not persist beyond 2014.

Jong *et al.* (2024) document the increase of tropical influences on precipitation events in the Northeast since 1959 and concluded, “The autumn extreme precipitation trend over the Northeast U.S. is primarily attributed to tropical cyclone-related events since the 1990s.” The question then becomes: was the temporal clustering of tropical systems in 1997-2014 which affected the Northeast a response to increasing GHGs? Jong *et al.* examined CMIP-6 model output which suggests that there will be fewer such systems in the 21st century but that the intensity of the rainfall events might increase. This conjecture is not seen in Fig. 6.4.5 where the amount-per-event has remained steady over the 135-year period.

There is some evidence to indicate the heaviest rainfall events may be redistributed due to the impact of urban infrastructure on the local weather (e.g., Pielke Sr. *et al.* 2011, Zhang *et al.* 2018, Yang *et al.* 2024). Yang *et al.* state “Cities that experience compact development tend to witness larger increases in extreme rainfall frequency over downtown than their rural surroundings, while the anomalies in extreme rainfall frequency diminish for cities with dispersed development.” While this is an important insight to consider, the effect on the specific stations used in this analysis is unknown, or at least not detectable in Fig. 6.4.5.

In summary, some U.S. regions show short-duration increases in extreme precipitation events, consistent with natural variability. But analysis of long term, nationwide historical records that considers the autocorrelation properties of precipitation data does not support the claim that extreme short-duration rainfall events are becoming more frequent or intense.

6.5 Tornadoes

The IPCC AR6 assesses tornado trends in the U.S. as follows:

[O]bservational trends in tornadoes, hail, and lightning associated with severe convective storms are not robustly detected due to insufficient coverage of the long-term observations. There is *medium confidence* that the mean annual number of tornadoes in the USA has remained relatively constant. (Chapter 11, section 11.7.3, p. 1594)

The monitoring of weak tornadoes has changed over time. The growth of rural populations and the increasing ability to take video with hand-held devices has led to more frequent reports of weak tornadoes that produce minimal damage. In contrast, strong to violent tornadoes have been observed more consistently over time. Note that tornado strength is measured by the damage it produces, not by the visual appearance of the funnel. Limited real-time observational capabilities in earlier decades did not prevent identification because strong to violent tornadoes leave much more damage which will be assessed later even if the tornado itself was not observed. Since statistics began in 1950, there has been a substantial decrease (by about 50%) in the number of strong to violent tornadoes as shown in Fig. 6.5.1a.

To summarize, there is a noticeable downward trend in the number of severe tornadoes in the U.S. since 1950. After 1990 the number of weak tornadoes in the U.S. has remained roughly constant; data before that are incomplete due to limited monitoring.

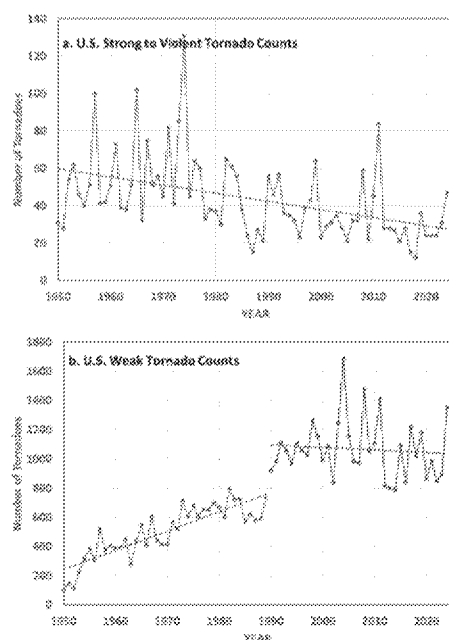


Figure 6.5.1. Annual U.S. tornado counts for (a) strong to violent tornadoes (EF3 to EF5), and (b) weak tornadoes (EF0 to EF2). Based upon NOAA Storms Prediction Center data, available at https://www.spc.noaa.gov/wcm/data/1950-2024_actual_tornadoes.csv

6.6 Flooding

Changes in floods were assessed as follows:

AR6: The SREX **assessed low confidence for observed changes in the magnitude or frequency of floods** at the global scale. This assessment was confirmed by the AR5 report. The SR15 found increases in flood frequency and extreme streamflow in some regions, but decreases in other regions. . . [H]ydrological literature on observed flood changes is heterogeneous, focusing at regional and sub-regional basin scales, making it difficult to synthesise at the global and sometimes regional scales. (Chapter 11.5)

AR6: [T]he seasonality of floods has changed in cold regions where snowmelt dominates the flow regime in response to warming (*high confidence*). Confidence about peak flow trends over past decades on the global scale is *low*. (Chapter 11.5)

NCA4: Trends in extreme high values of streamflow are **mixed** across the United States. Analysis of 200 U.S. stream gauges indicates areas of both increasing and decreasing flooding magnitude **but does not provide robust evidence** that these trends are attributable to human influences (pp. 240-241)

The absence of detectable US-wide trends in flooding is consistent with the findings in Section 6.4 of absence of coherent changes in extreme precipitation.

6.7 Droughts

Assessments of drought trends were as follows.

AR6: Few AR6 regions show observed increases in meteorological drought (Section 11.9, p. 1575),

AR6: Increasing trends in agricultural and ecological droughts have been observed on all continents (*medium confidence*), but decreases only in one AR6 region (*medium confidence*). Increasing trends in hydrological droughts have been observed in a few AR6 regions. (Chapter 11 Summary)

NCA4: As a consequence of this increased precipitation, **drought statistics over the entire CONUS have declined**. (p. 233)

NCA4: Recent droughts and associated heat waves have reached record intensity in some regions of the United States; however, by geographical scale and duration, the Dust Bowl era of the **1930s remains the benchmark** drought and extreme heat event in the historical record (very high confidence). (p. 231)

SREX: From a paleoclimate perspective, **recent droughts are not unprecedented**, with severe ‘megadroughts’ reported in the paleoclimatic record for Europe, North America, and Australia. (p. 170)

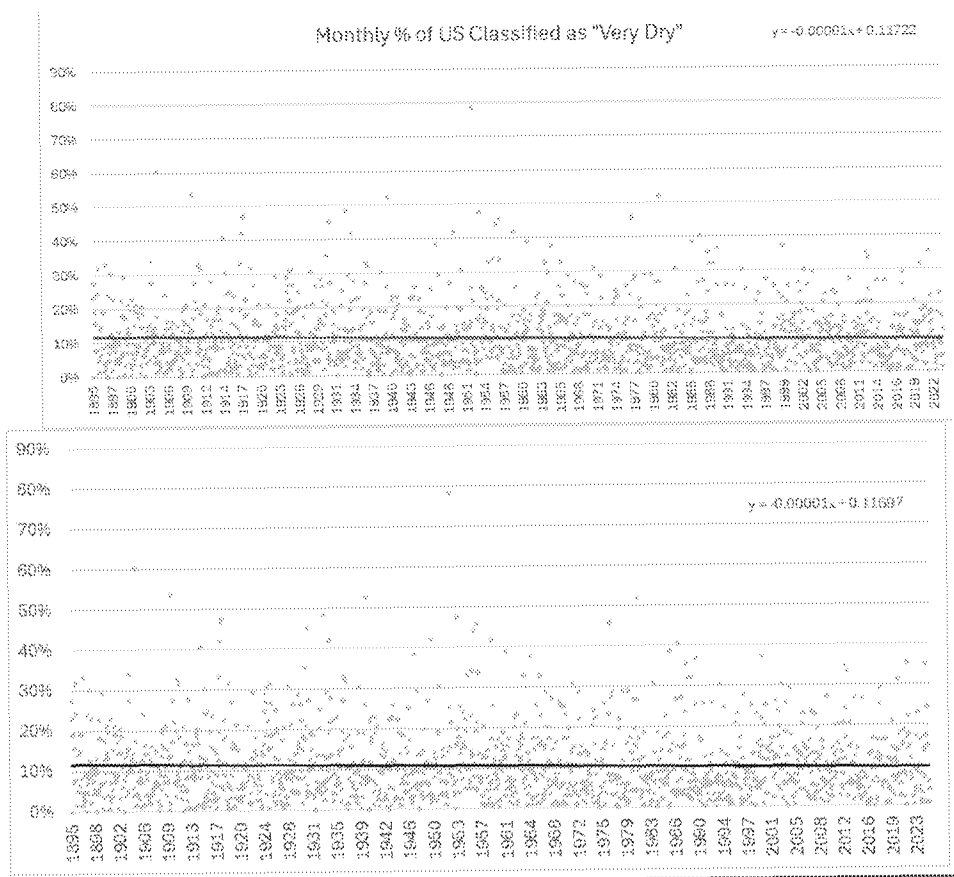


Figure 6.7.1: Monthly percent of US U.S. dryness (%) classified as "Very Dry" 1895–2023/2025.
 Source: Data source: NOAA [HYPERLINK "<https://www.ncsl.noaa.gov/access/monitoring/uspa/wet-dry/0>"] least squares trendline added.

Formatted: Font: Not Bold

Formatted: Indent: First line: 0"

As shown in Figure 6.7.1, U.S. long-term data shows an insignificantly declining trend in extreme dryness (-0.001 percent per year)

Kogan *et al.* (2020) examines a 38-year high-resolution satellite-based drought measure and concludes that global drought has not intensified and is not connected to climate change: "it is possible to state firmly that global and main grain countries' drought area and intensity trends have not been following global climate warming since 1980's."

In summary there is no evidence of increasing drought frequency or intensity in the U.S. or globally over recent decades.

6.8 Wildfires

The IPCC has not provided an assessment of wildfires. As shown in Figure 6.8.1, global wildfire activity as measured by European Space Agency shows a downward trend in the 21st century.

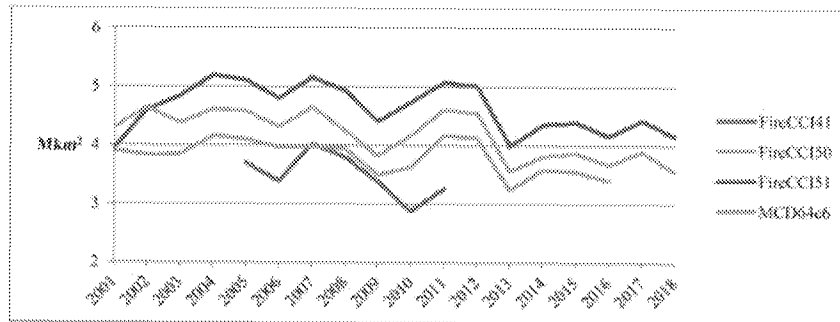


Figure 6.8.1: Global wildfire area 2001-2018. Source: From Lizundia-Loiola *et al.* (2021) Figure 12. The different coloured lines represent data products derived from different satellites and algorithms

Global data show that wildfire coverage is constant or declining on every continent (Samborska and Ritchie, 2024).

Active fire suppression since 1900 makes it difficult to establish a natural baseline for wildfire activity in the U.S. Paleoclimatic evidence indicates that past activity was much higher than today. Marlon *et al.* (2012) used sedimentary charcoal layers to reconstruct fire history of western U.S. for the past 1400 years and also fit a model to predict fire activity as a function of climatic conditions. Their results are summarized in Figure 6.8.2 below (from Figure 2 in their paper). There has been a growing wildfire deficit over the 20th century. In other words, however much fire was observed in the 20th century, it was less than what would have been observed in previous centuries based on the climatic conditions. Parks *et al.* (2025) likewise find that despite the recent increase in wildfire burn area in North America, a significant wildfire deficit remains relative to historical wildfire regimes.

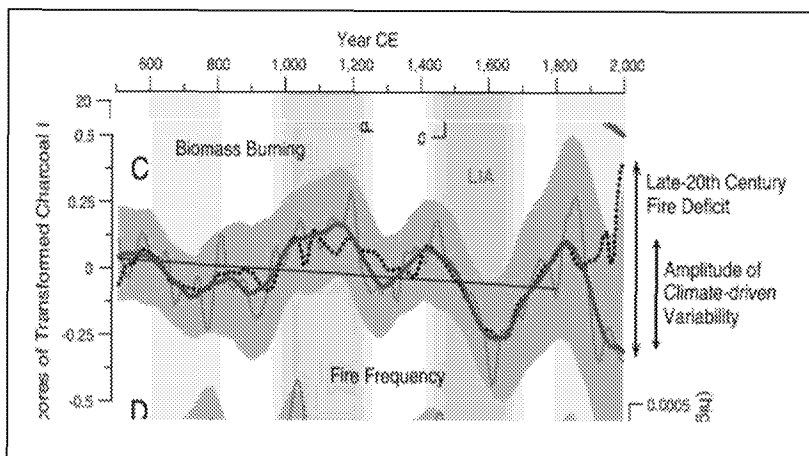


Figure 6.8.2 Fire frequency and fire deficit in the US. The red line shows the smoothed charcoal record and the black dotted line shows the predicted charcoal record based on climatic conditions model. Source: Marlon *et al.* (2012) Figure 2.

U.S. data from the National Interagency Fire Centre (NIFC) from 1926 to 2023 are shown in Figure 6.8.3. The NIFC has removed the pre-1960 data from its current website on the grounds that measurement methods changed after 1960 making the comparison unreliable. Nonetheless just focusing on the post-1985 interval the number of fires is not increasing. The area burned did increase but only until about 2007.

Forest fires have always been a part of nature, and they can certainly create conditions that are inhospitable in the short term for all life, including humans. Science has confirmed the overall benefit and necessity of forest fires. While recent high-profile fires and seasons serve as a reminder of the potential destructive impact, the highest profile U.S. forest fire remains the 1910 Big Blowup fire in the U.S. west, which destroyed over three million acres and eliminated entire towns like Taft, MT (Apple, 2020). The 1910 fire reshaped the U.S. Forest Service (National Forest Foundation 2022) leading to a focus on fire suppression with a primary goal of defeating all forest fires (Forest History Society, 2022). This led to the “10 am rule” in 1935 requiring that all fires spotted on any day had to be controlled by 10 am the following day (National Forest Foundation, 2022).

While defeating all fires seemed a noble goal, questions began to arise as to whether this behavior “followed the science” (U.S. Forest Service, 2022). Over time the U.S. Forest Service has begun to rethink its goals, recognizing that new approaches such as prescribed burns, fuel elimination, and controlled wildfires are more appropriate (Sommer, 2016). Recent research is validating this approach and recognizing that more frequent smaller fires likely result in healthier forests, water ecosystems and biodiversity (Stephens *et al.*, 2021).

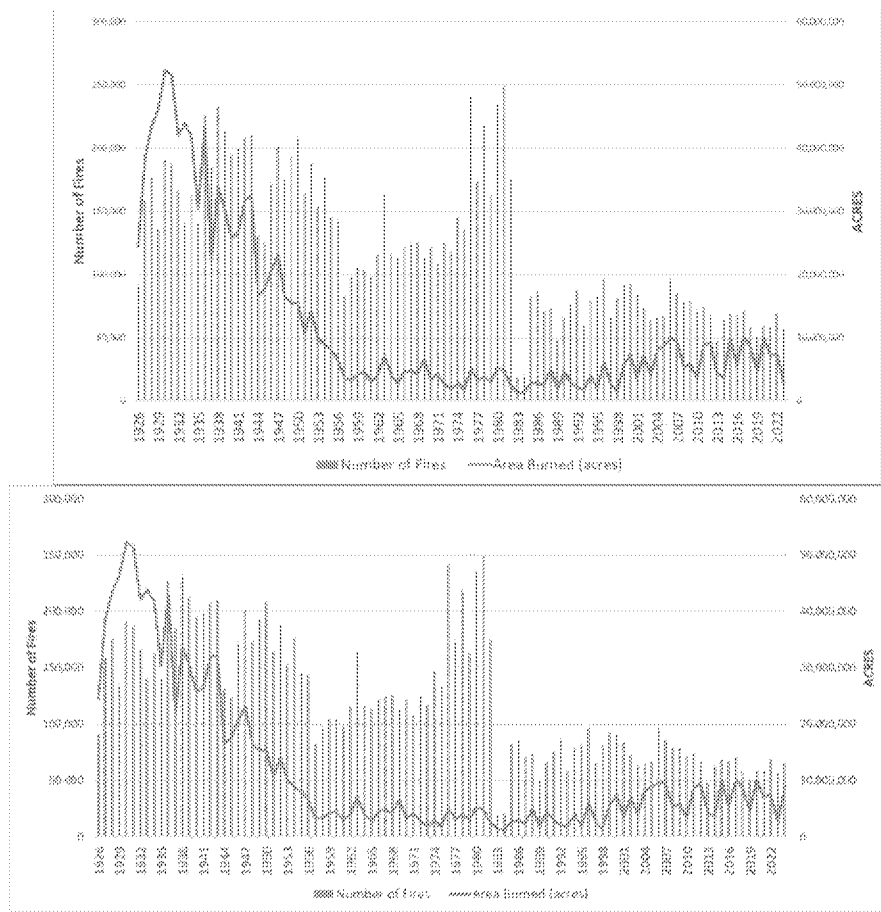


Figure 6.8.3: U.S. wildfires 1926 to 2023. Source: Post-2018: National InterAgency Fire Center data [HYPERLINK "<https://www.nifc.gov/fire-information/statistics/wildfires>"] Pre-2017 webarchive.org(n.d.).

References

- Apple, C. (2020, January 21). 1910 fire – The big burn across Montana and Idaho. *The Spokesman-Review*. [HYPERLINK "<https://www.spokesman.com/stories/2020/jan/19/1910-fire-big-burn-across-montana-and-idaho/>" \t "_new"]
- Bell, Gerald D. and Muthuvel Chelliah, "Leading Tropical Modes Associated with Interannual and Multidecadal Fluctuations in North Atlantic Hurricane Activity," *Journal of Climate* 19, no. 4 (February 15, 2006): 590–612, [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1175/JCLI3659.1>"].

- Brewer, W. H. (1930). *Up and down California in 1860–1864: The journal of William H. Brewer*. University of California Press.
- Christy, J. R., Norris, W. B., and McNider, R. T. (2009). Surface temperature variations in East Africa and possible causes. *Journal of Climate*, 22(12), 3342–3356. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2726.1>
- Cohn, T. A. and Lins, H. F. (2005). Nature's style: Naturally trendy. *Geophysical Research Letters*, 32(23). [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1029/2005GL024476>" \t "_new"]
- Colorado State University. (2025). *Realtime tropical cyclone guidance*. [HYPERLINK "<https://tropical.atmos.colostate.edu/Realtime/index.php>" \t "_new"]
- Forest History Society (2022). *The 1910 fires*. [HYPERLINK "<https://foresthstory.org/research-explore/us-forest-service-history/policy-and-law/fire-u-s-forest-service/famous-fires/the-1910-fires/>" \t "_new"]
- Gershunov, A., and K. Guirguis (2012). California heat waves in the present and future. *Geophysical Research Letters*, 39(18). [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1029/2012GL052979>" \t "_new"]
- Gershunov, A., T. Shulgina, F.M. Ralph, D.A. Lavers J.J. and Rutz (2017). Assessing the climate-scale variability of atmospheric rivers affecting western North America. *Geophysical Research Letters*, 44(15), 7900–7908. <https://doi.org/10.1002/2017GL074175>
- Goldenberg, Stanley *et al.*, “The Recent Increase in Atlantic Hurricane Activity: Causes and Implications,” *Science* 293, no. 5529 (July 20, 2001): 474–479, <https://doi.org/10.1126/science.1060040>.
- Howarth, M. E., C.D. Thorncroft, and L.F. Bosart (2019). Changes in extreme precipitation in the Northeast United States: 1979–2014. *Journal of Hydrometeorology*, 20(4), 673–689. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0155.1>
- Hurst, H. E. (1951). Long term storage capacities of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116, 776–808.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (V. Masson-Delmotte *et al.*, Eds.). Cambridge University Press. [HYPERLINK "<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>" \t "_new"]
- Jong, B.-T., H. Murakami, T.L. Delworth and W.F. Cooke (2024). Contributions of tropical cyclones and atmospheric rivers to extreme precipitation trends over the Northeast US. *Earth's Future*, 12, e2023EF004370. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1029/2023EF004370>" \t "_new"]
- Karl, T. R., C.N. Williams Jr., F.T. Quinlan, and T.A. Boden (1990). *United States Historical Climatology Network (HCN) serial temperature and precipitation data* (Publication No. 3404). Oak Ridge National Laboratory.
- Klotzbach, Phil *et al.* (2018) Continental U.S. Hurricane Landfall Frequency and Associated Damage: Observations and Future Risks, *Bulletin of the American Meteorological Society* 99, no. 7 (July 2018): 1359–1376, [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0184.1>"].
- Kogan, Feliz, Wei Guob and Wenze Yang (2020) “Near 40-year drought trend during 1981–2019 earth warming and food security” *Geomatics, Natural Hazards and Risk* Vol 11(1)
- Koutsoyiannis, D. (2013) Hydrology and Change. *Hydrological Sciences Journal* 58(6) [HYPERLINK "<http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.804626>"]
- Lizundia-Loiola, J., *et al.* (2020) A spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data. *Remote Sensing of the Environment* 236, 111493, [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111493>"]
- Markonis, Y., and D. Koutsoyiannis (2016). Scale-dependence of persistence in precipitation records. *Nature Climate Change*, 6, 399–401. <https://doi.org/10.1038/nclimate2894>
- Marlon, Jennifer, Patrick J Bartlein, Daniel G. Gavin *et al.* (2012) Long-term perspective on wildfires in the western USA *Proceedings of the National Academy of Sciences* February 14 2012 [HYPERLINK "<https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.1112839109>"]

- Maue, R. N. (2025). *Climatlas: Tropical cyclones*. [HYPERLINK "<https://climatlas.com/tropical/>" \t "_new"]
- McKittrick, R., and J.R. Christy (2019). Assessing changes in US regional precipitation on multiple time scales. *Journal of Hydrology*, 578, 124074. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124074>" \t "_new"]
- McKittrick, R., and J.R. Christy (2025), "Data and Code for DoE Report 2025", Mendeley Data, V1, doi: 10.17632/8n9ks93vn7.1
- Null, J. and J. Hulbert, "California Washed Away: The Great Flood of 1862," *Weatherwise* 60, no. 1 (2007): 26–30, [HYPERLINK "<https://doi.org/10.3200/wewi.60.1.26-30>"]
- National Forest Foundation. (2022). *Blazing battles: The 1910 fire and its legacy*. [HYPERLINK "<https://www.nationalforests.org/our-forests/your-national-forests-magazine/blazing-battles-the-1910-fire-and-its-legacy>" \t "_new"]
- National Interagency Fire Center. (2024). *Wildfire statistics*. [HYPERLINK "<https://www.nifc.gov/fire-information/statistics/wildfires>" \t "_new"]
- NCA4. (2017). *Climate science special report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* (D. J. Wuebbles, D. W. Fahey, and K. A. Hibbard, Eds.). U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/J0J964J6>
- NCA5. (2023). *Fifth National Climate Assessment* (A. R. Crimmins *et al.*, Eds.). U.S. Global Change Research Program. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.7930/NCA5.2023.CH1>" \t "_new"]
- NOAA Hurricane Research Division. (2025a). *All U.S. hurricanes (1851–2019)*. [HYPERLINK "https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/All_U.S._Hurricanes.html" \t "_new"]
- NOAA Hurricane Research Division. (2025b). *Most intense (3, 4, 5) continental United States hurricanes: 1851–1970, and 1983–2023*. [HYPERLINK "https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/most_intense.html" \t "_new"]
- Overland, J. E. (2021). Causes of the record-breaking Pacific Northwest heatwave, late June 2021. *Atmosphere*, 12(11), 1434. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.3390/atmos12111434>" \t "_new"]
- Pan, M., M. Lu and U. Lall (2024). Diversity of cross-Pacific atmospheric river main routes. *Communications Earth and Environment*, 5, 378. [HYPERLINK "<https://www.nature.com/articles/s43247-024-01552-y>" \t "_new"]
- Parks, Sean, Christopher Guiterman, Ellis Margolis *et al.* (2025) A fire deficit persists across diverse North American forests despite recent increases in area burned. *Nature Communications* 16 [HYPERLINK "<https://www.nature.com/articles/s41467-025-56333-8>"]
- Pielke, R. A., *et al.* (2011). Land use/land cover changes and climate: Modeling analysis and observational evidence. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2, 828–850. <https://doi.org/10.1002/wcc.144>
- Porter, K., *et al.* (2011). *Overview of the ARkStorm scenario*. U.S. Geological Survey.
- Quinlan, F. T., T. R. Karl, and C.N. Williams Jr. (1987). *United States Historical Climatology Network (USHCN) serial temperature and precipitation data* (NDP-019). Oak Ridge National Laboratory.
- Seneviratne, S. *et al.* (2021) "Chapter 11: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate." In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, *et al.*, 1513–1766. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>.
- Samborska, V., and H. Ritchie (2024). Wildfires. *Our World in Data*. [HYPERLINK "<https://ourworldindata.org/wildfires>" \t "_new"]

- Sommer, L. (2016, November 7). Let it burn: The Forest Service wants to stop putting out some fires. *KQED*. [HYPERLINK "<https://www.kqed.org/science/1134217/let-it-burn-the-forest-service-wants-to-stop-putting-out-some-fires>" \t "_new"]
- Stephens, Scott *et al.*, (2021) “Fire, Water, and Biodiversity in the Sierra Nevada: A Possible Triple Win,” *Environmental Research Communications* 3, no. 8 (August 6, 2021): p. 081004, <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac17e2>.
- U.S. Forest Service. (2022). *Managing fire*. [HYPERLINK "<https://www.fs.usda.gov/science-technology/fire>" \t "_new"]
- USGCRP. (2023). *USGCRP indicators platform: Heat waves*. [HYPERLINK "<https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves>" \t "_new"]
- Vecchi, Gabriel A. and Thomas R. Knutson (2011) “Estimating Annual Numbers of Atlantic Hurricanes Missing from the HURDAT Database (1878–1965) Using Ship Track Density,” *Journal of Climate* 24, no. 6 (2011): 1736–1746, [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1175/2010JCLI3810.1>"].
- Villarini, Gabriele, Gabriel A. Vecchi, and James A. Smith, “U.S. Landfalling and North Atlantic Hurricanes: Statistical Modeling of Their Frequencies and Ratios,” *Monthly Weather Review* 140, no. 1 (January 2012): 44–65, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00063.1>.
- Web Archive. (n.d.). *Archive of NIFC fire data*. [HYPERLINK "https://web.archive.org/web/20200212033452/https://www.nifc.gov/fireInfo/fireInfo_stats_totalFires.html" \t "_new"]
- Yang, L., Y. Yang, Y. Shen, *et al.* (2024). Urban development pattern’s influence on extreme rainfall occurrences. *Nature Communications*, 15, 3997. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1038/s41467-024-48533-5>" \t "_new"]
- Zhang, W., G. Villarini, G.A. Vecchi, and J.A. Smith, J. A. (2018). Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by Hurricane Harvey in Houston. *Nature*, 563, 384–388. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0676-z>"]

7 CHANGES IN SEA LEVEL

Chapter Summary

Since 1900, global average sea level has risen by about 8 inches. Sea level change along U.S. coasts is highly variable, associated with local variations in processes that contribute to sinking and also with ocean circulation patterns. The largest sea level rise along U.S. coasts are Galveston, New Orleans, and the Chesapeake Bay regions - each of these locations is associated with substantial local land sinking (subsidence) unrelated to climate change.

Extreme projections of global sea level rise are associated with an implausible extreme emissions scenario and inclusion of poorly understood processes associated with hypothetical ice sheet instabilities. In evaluating the IPCC AR6 projections to 2050 (with reference to the baseline period 1995–2014), almost half of the sea level rise has already occurred by 2025 and at a lower rate than predicted. U.S. tide gauge measurements shown herein reveal no obvious acceleration beyond the historical average rate of sea level rise.

7.1 Global sea level rise

Global sea level rise is arguably the most important climate impact driver that is unambiguously associated with increasing temperatures. At the global level, warming raises sea level through thermal expansion of sea water and through melting of glaciers and ice sheets. Variations in land water storage are another important factor. At the regional scale, sea level change is influenced by large-scale ocean circulation patterns, and geologic processes and deformation from the redistribution of ice and water. Locally, vertical land motion from geologic processes, ground water withdrawal, and fossil fuel extraction are also important.

The IPCC AR6 estimates that global mean sea level increased by 7.9 (5.9–9.8) inches between 1901 and 2018, with the rate of sea level rise accelerating in recent decades. At the ocean basin scale, sea levels have risen fastest in the Western Pacific and slowest in the Eastern Pacific over the period 1993–2018 (Fox-Kemper *et al.*, 2021). The rate of global sea level rise is estimated to be 0.12 inches/year (about the height of two stacked pennies) (NASA, 2020).

The observing systems for global sea level rise have advanced significantly in the satellite era, particularly with the advent of satellite altimeters in 1993. Local tide gauges have provided useful data for the past century, and even longer for a few locations. Following the end of the Little Ice Age in the mid-nineteenth century, tide gauges show that the global mean sea level began rising during the period 1820–1860, well before most anthropogenic greenhouse gas emissions.

7.2 U.S. sea level rise

Observed and predicted rates of mean global sea level rise might have little scientific relevance for specific locations, owing to local processes (NOAA, 2025). Figure 7.1 shows that in Canada and Alaska (and also northern Washington), sea level is decreasing, owing to uplift from glacial rebound. Most of the Pacific coast tide gauges show rises between 0.12 inches/year, while largest U.S. rates are on the Gulf coast (Louisiana and Texas) and in the mid-Atlantic states (Chesapeake Bay region).

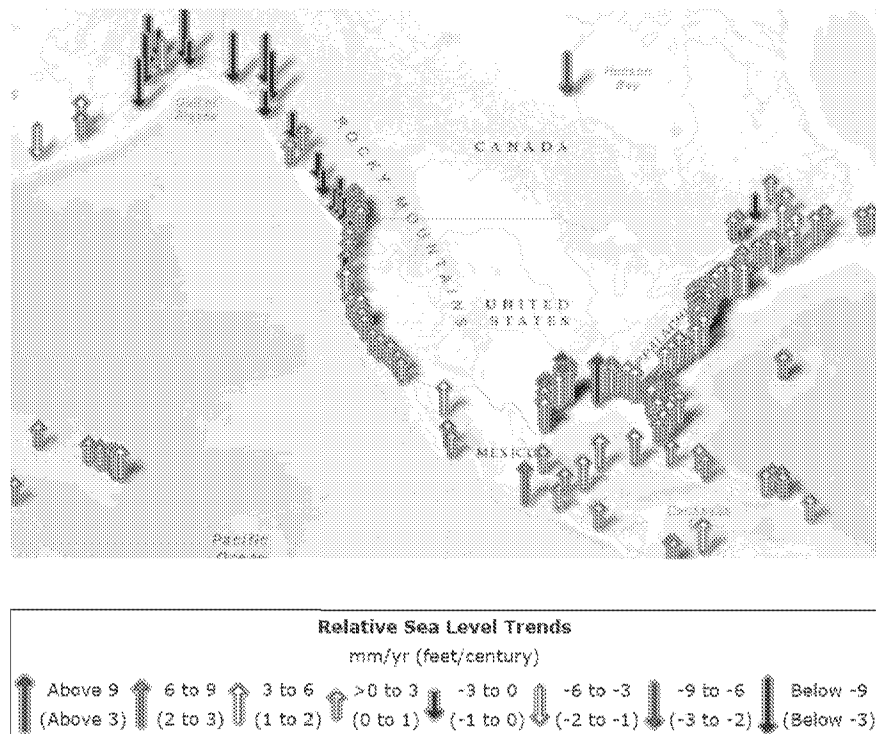


Figure 7.1. Map of rates of relative sea level rise along the U.S. coast (NOAA, <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/>). For reference, 3 mm = 0.12 in.

Measurements of relative sea level rise from tide gauges conflate the climatologically relevant increase in the volume of seawater with local vertical land motion. The latter, which varies from place to place, is best measured using a Global Positioning System (GPS) station located near the tide gauge. It is driven by a range of processes that can be comparable to the climate signal and can locally exacerbate (subsidence/sinking) or mitigate (uplift) the risk of sea level rise (Wöppelmann and Marcos, 2016). Human activities triggering subsidence are often significant. They include soil drainage (e.g. for urban development purposes) and subsurface extraction of groundwater or hydrocarbons.

Table 7.1 shows absolute sea-level rise (ASLR) for selected locations, determined from the sum of uncorrected sea-level rise as estimated from tide gauge time series (RSLR) (NOAA, 2025) and the vertical land motion (VLM) measurements (NAS, 2012; Letetrel *et al.*, 2015; Karegar *et al.*, 2016). The absolute sea level rise for each of these locations is significantly smaller than the measured relative sea level rise owing to local subsidence. More than half of the measured relative sea level rise is attributed to land sinking for these locations: San Francisco, Galveston, Grand Isle. For reference, the global average rate of absolute sea level rise is estimated to be 0.12 inches/year.

Location	RSLR	VLM	ASLR
San Francisco, CA	+0.08	-0.06	+0.02
Galveston, TX	+0.26	-0.19	+0.07
Grand Isle, LA	+0.36	-0.28	+0.08
St Petersburg, FL	+0.12	-0.02	+0.10
New York City, NY	+0.11	-0.05	+0.06

Table 7.1 Absolute sea level rise (inches/year) consisting of Relative Sea Level Rise (RSLR) plus Vertical Land Motion (VLM)

San Francisco Bay

Over the past 100 years, relative sea level in the San Francisco Bay area has risen by 7.8 inches, at an average rate of 0.08 inches/year (Figure 7.2). As shown in Table 7.1, San Francisco's vertical land motion is -0.06 inches/year (sinking), producing a recent absolute rate of +0.02 inches/year. Portions of Treasure Island, San Francisco International Airport, and Foster City are sinking as fast as 0.4 inches/year (Shirzaei and Bürgmann, 2018). Problems in the San Francisco Bay area, including threats to the airport, are caused primarily by soil compaction in landfill zones that were formerly wetlands, not by the slow creep of global sea level rise.

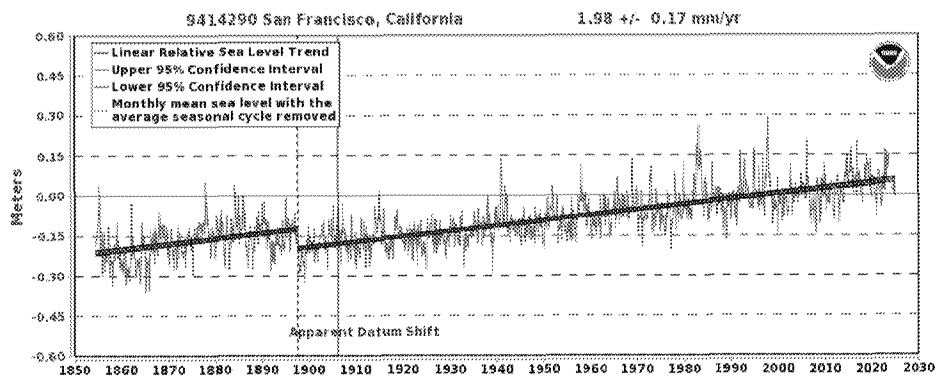


Figure 7.2. Tide gauge measurements at San Francisco, California, obtained from NOAA - https://tidesandcurrents.noaa.gov/strends/strends_station.shtml?id=9414290 (downloaded 4/22/25).

Galveston - Houston

Long-term tide measurements at Galveston Pier 21 show sea level rise of 2.18 feet in the past century, or a rate of 0.26 inches/year (Figure 7.3). Vertical land motion (subsidence) at Galveston is estimated at -0.19 inches/year, yielding an absolute rate of rise of +0.07 inches/year (Table 7.1). The U.S. Geologic Survey found that most of the land-surface subsidence in the Houston-Galveston region is a direct result of groundwater withdrawals (Kasmarek and Ramage 2017), which caused compaction of the aquifer sediments, mostly in the fine-grained silt and clay layers. By 1979, as much as 10 feet of subsidence had occurred in Houston.

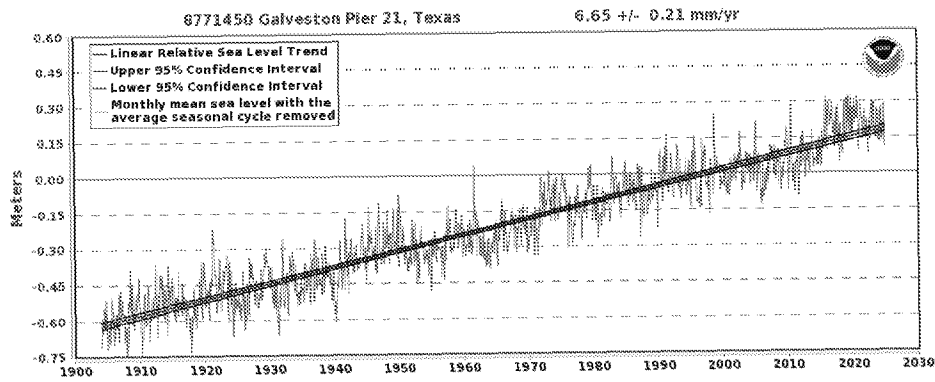


Figure 7.3. Tide gauge measurements Galveston Pier, TX, obtained from NOAA - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8771450 (downloaded 4/22/2025).

New Orleans and the Mississippi delta

Long-term tide gauge measurements at Grand Isle, Louisiana, show that sea level has risen by slightly more than 3 feet over the last 100 years at an average rate of 0.36 inches/year (Figure 7.4). Vertical land motion (subsidence) is estimated -0.28 inches/year. Table 7.1 gives the absolute sea level rise as +0.08 inches/year.

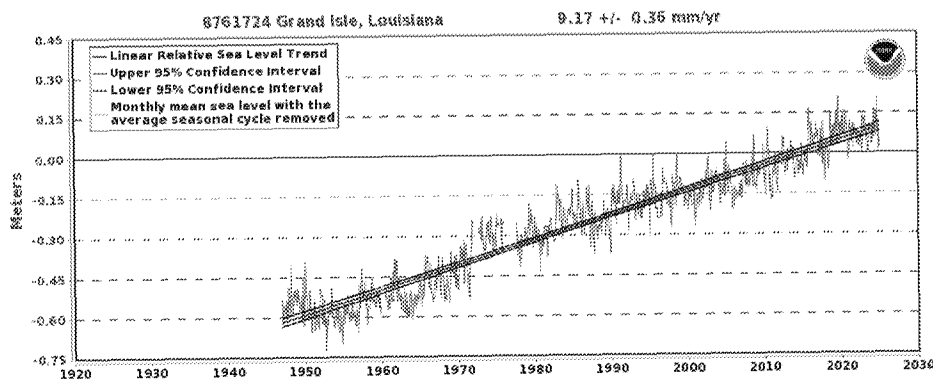


Figure 7.4. Tide gauge measurements at Grand Isle, LA, obtained from NOAA - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8761724 (downloaded 4/22/25).

The issues of sea level rise and land loss in the Mississippi Delta region are complex, with geological subsidence and the decline in sediment transported by the Mississippi river being the dominant drivers. The construction of dams in the basin since the 1950s has decreased the Mississippi’s suspended sediment load by ~50 percent (Maloney 2018). A new subsidence map of coastal Louisiana finds the coastal region to be sinking at about one third of an inch per year (Neinhuis *et al.* 2017), associated with groundwater and resource withdrawal. As the city’s elevation averages one to two feet *below* sea level, sea level rise from anthropogenic warming is hardly the dominant driver of New Orleans’ problems.

New York City

New York City is particularly vulnerable to the effects of sea level rise because it is built primarily on islands and has 520 miles of coastline. Measurements by a tide gauge at the southern tip of Manhattan (The Battery) show that relative sea level has risen over 11 inches over the past century, at an average rate of 0.11 inches/year (Figure 7.5). But vertical land motion in the New York City area is -0.05 inches/year (roughly 5 inches per century), so that the absolute rate of sea level rise at The Battery is 0.06 inches/year, or about 55 percent of the measured relative sea level rise.

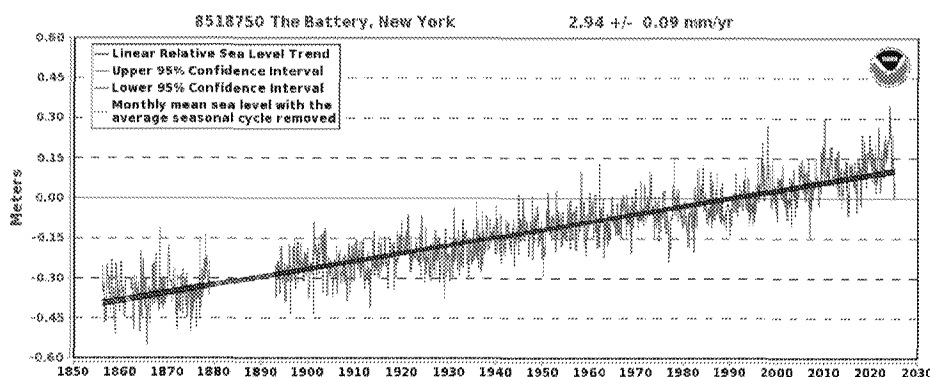


Figure 7.5. Tide gauge measurements at The Battery, New York, obtained from NOAA - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8518750 (downloaded 4/22/25).

7.3 Projected sea level rise

The concern over sea level rise is not about the roughly 8 inches of global rise since 1900. Rather, it is about projections of *accelerated* rise based upon simulations of a warming climate through the 21st ~~Century~~ century.

The IPCC AR6 finds *high agreement* across published global mean sea level projections for 2050 with little sensitivity to emissions scenarios. Considering only projections incorporating ice-sheet processes in whose quantification there is at least *medium confidence*, the global sea level projections for 2050, across all emissions scenarios, fall between 3.94 and 15.75 inches (5th–95th percentile *very likely* range) relative to the 1995–2014 baseline period (Fox-Kemper *et al.*, 2021).

Conversely, AR6 states there is *low agreement* across published global mean sea level projections for 2100, particularly for higher emissions scenarios. Considering only projections representing ice sheet processes in whose quantification there is at least *medium confidence*, the AR6 global mean sea level projections for 2100 lie between 7.87 and 39.37 inches (5th–95th percentile *very likely* range) under the medium emissions scenario SSP2–4.5 (Fox-Kemper *et al.*, 2021). There is deep uncertainty surrounding projections of sea level rise to 2100 owing to uncertainties in ice sheet instabilities, particularly for the higher emissions scenarios.

In evaluating the IPCC AR6 projections to 2050 (with reference to the baseline period 1995–2014), almost half of the sea level rise has already occurred by 2025. From the tide gauge measurements in Figures 7.2–7.5, there is little to no obvious acceleration in sea level rise beyond the historical average rate.

In February 2022, NOAA issued its projections of sea level rise for various sites along the U.S. coast (Sweet *et al.*, 2022). They claim that by 2050, the sea will have risen one foot at The Battery in Manhattan (relative to 2020). A one-foot rise in thirty years would be more than twice the current rate and about three times the average rate over the past century. In that historical context, NOAA’s projection is remarkable—as shown in Figure 7.6, it would require a dramatic acceleration beyond anything observed since the early 20th century. But even more noteworthy is that they Sweet *et al.* (2022) say this rise is “locked in”—it will happen no matter what future emissions are. We should know in a decade or so whether that prediction has legs.

Formatted: Font: Italic

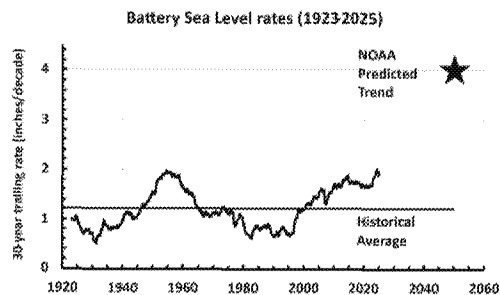


Figure 7.6 Rate of sea level rise at the Battery in Manhattan. Shown is the historical thirty-year trailing trend, together with the allegedly “locked in” NOAA predicted trend for 2050. Historical data: NOAA Tides and Current.

References

Fox-Kemper, B., Hewitt, H. T., Xiao, C., Adalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S. S., Edwards, T. L., ... & Yu, Y. (2021). Ocean, cryosphere and sea level change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1211–1362). Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.

- Karegar, M. A., Dixon, T. H., & Engelhart, S. E. (2016). Subsidence along the Atlantic Coast of North America: Insights from GPS and late Holocene relative sea level data. *Geophysical Research Letters*, 43(7), 3126–3133. [HYPERLINK "https://doi.org/10.1002/2016GL068015" \t "_new"]
- Kasmarek, M. C., & Ramage, J. K. (2017). *Water-level altitudes 2017 and water-level changes in the Chicot, Evangeline, and Jasper aquifers and compaction 1973–2016 in the Chicot and Evangeline aquifers, Houston-Galveston Region, Texas* (Scientific Investigations Report 2017–5080). U.S. Geological Survey. [HYPERLINK "https://doi.org/10.3133/sir20175080" \t "_new"]
- Letetrel, C., Becker, M., Llovel, W., & Cazenave, A. (2015). Estimation of vertical land movement rates along the coasts of the Gulf of Mexico over the past decades. *Continental Shelf Research*, 111(Part A), 42–51. [HYPERLINK "https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.10.018" \t "_new"]
- Maloney, J. M., Bentley, S. J., Xu, K., Obelcz, J., Georgiou, I. Y., & Miner, M. D. (2018). Mississippi River subaqueous delta is entering a stage of retrogradation. *Marine Geology*, 400, 12–23. [HYPERLINK "https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.03.001" \t "_new"]
- National Academy of Science (NAS, 2012). *Sea-level rise for the coasts of California, Oregon and Washington: Past, present, and future*. Appendix A: Vertical land motion and sea-level data along the West Coast of the United States. National Academies Press.
https://nap.nationalacademies.org/catalog/13389/sea-level-rise-for-the-coasts-of-california-oregon-and-washington
- NASA. (2020). *NASA sea level rise portal: 2020 edition*. [HYPERLINK "https://www.nasa.gov/specials/sea-level-rise-2020/" \t "_new"]
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Center for Operational Oceanographic Products and Services. (n.d.). *Sea level trends*. [HYPERLINK "https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/" \t "_new"]
- NOAA Tides & Currents. (n.d.). *Relative sea level trends*. [HYPERLINK "https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/" \t "_new"]
- Nienhuis, J. H., Törnqvist, T. E., Esposito, C. R., Liang, M., & Ma, H. (2017). A new subsidence map for coastal Louisiana. *GSA Today*, 27(6), 28–29. [HYPERLINK "https://doi.org/10.1130/GSATG337GW.1" \t "_new"]
- Shirzaei, M., & Bürgmann, R. (2018). Global climate change and local land subsidence exacerbate inundation risk to the San Francisco Bay Area. *Science Advances*, 4(3), eaap9234. [HYPERLINK "https://doi.org/10.1126/sciadv.aap9234" \t "_new"]
- Sweet, W. V., Hamlington, B. D., Kopp, R. E., et al. (2022). *Global and regional sea level rise scenarios for the United States* (USGS Report 70229139). United States Geological Survey. [HYPERLINK "https://www.usgs.gov/publications/global-and-regional-sea-level-rise-scenarios-united-states" \t "_new"]
- Wöppelmann, G., & Marcos, M. (2016). Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. *Reviews of Geophysics*, 54, 64–92. https://doi.org/10.1002/2015RG000502

8 UNCERTAINTIES IN CLIMATE CHANGE ATTRIBUTION

Chapter summary

“Attribution” refers to identifying the cause of some aspect of climate change, specifically with reference to anthropogenic activity. There is an ongoing scientific debate around attribution methods, particularly regarding extreme weather events. Attribution is made difficult by high natural variability, the relatively small expected anthropogenic signal, lack of high-quality data, and reliance on deficient climate models. The IPCC has long cautioned that methods to establish causality in climate science are inherently uncertain and ultimately depend on expert judgement.

Substantive criticism of the main IPCC assessments of the role of CO₂ in recent warming focus on inadequate assessment of natural climate variability, uncertainties in measurement of solar variability and in aerosol forcing, and problems in the statistical methods used for attribution.

The IPCC does not in general make attribution claims for most climate impact drivers related to extreme events. Statements related to statistics of global extremes (e.g. event probability or return times, magnitude and frequency) are not generally considered accurate owing to data limitations and are made with low confidence. Attribution of individual extreme weather events is challenging due to their rarity. Conflicting claims about the causes of the 2021 Western North America Heatwave illustrate the perils of hasty attribution claims about individual extreme events.

8.1 Introduction

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) distinguishes between detection of climate change and attribution of its cause. As defined by the IPCC AR6 WGI Glossary (IPCC, 2025):

Detection: Detection of change is defined as the process of demonstrating that climate or a system affected by climate has changed in some defined statistical sense, without providing a reason for that change. An identified change is detected in observations if its likelihood of occurrence by chance due to internal variability alone is determined to be small, for example, <10%.

Attribution: Attribution is defined as the process of evaluating the relative contributions of multiple causal factors to a change or event with a formal assessment of confidence.

Both steps detection and attribution rely on statistical analysis. Detection focuses on whether changes are significant enough to stand out from random variation regardless of cause. Attribution involves comparison of observed events to model-generated counterfactuals. Since experimentation on the climate is not possible, attribution requires statistical inference to assess how much human activities, such as GHG emissions, versus natural factors, like volcanic eruptions, contribute to observed changes. Attribution methods assume all external and internal drivers of the system are known and represented.

There are ongoing scientific debates around attribution methods, especially those for attributing extreme weather events to climate change. The IPCC has long cautioned that methods to establish causality in climate science are inherently uncertain and ultimately depend on expert judgement. AR4 Working Group I (Hegerl *et al.*, 2007) explained it as follows:

‘Attribution’ of causes of climate change is the process of establishing the most likely causes for the detected change with some defined level of confidence... unequivocal attribution would require controlled experimentation with the climate system. Since that is not possible, in practice attribution of anthropogenic climate change is understood to mean demonstration that a detected change is ‘consistent with the estimated responses to the given combination of anthropogenic and natural forcing’ and ‘not consistent with alternative, physically plausible explanations of recent climate change that exclude important elements of the given combination of forcings’ (IPCC, 2001)... The approaches used in detection and attribution research described above cannot fully account for all uncertainties, and thus ultimately expert judgement is required to give a calibrated assessment of whether a specific cause is responsible for a given climate change.

AR5 Working Group II (Cramer *et al.*, 2014) makes the following statement:

Two broad challenges to the detection and attribution of climate change impacts relate to observations and process understanding. On the observational side, high-quality, long-term data relating to natural and human systems and the multiple factors affecting them are rare. In addition, the detection and attribution of climate change impacts requires an understanding of the processes by which climate change, in conjunction with other factors, may affect the system in question.

Because of the complexity of the causal chains in the climate system, investigation of these relationships is exceptionally challenging.

be ~

8.2 Attribution methods

The IPCC employs several attribution methods to assess the causes of observed climate changes, distinguishing between natural and human-induced factors. Below is a concise description of the key IPCC attribution methods.

Optimal Fingerprinting uses linear regression to explain variations in observed climate data as a weighted sum of climate model simulations run with and without anthropogenic forcings. The data used in the regression model is weighted to try to minimize the influence of random noise and the estimation method is chosen to account for climate model error.

Time Series Analysis exploits statistical differences between anthropogenic forcing and natural variability to see which dominates observed temperatures and also uses variations in the timing of changes to determine if causal dependence across data series can be inferred.

Process-Based Attribution focuses on understanding the physical mechanisms behind observed changes. This approach combines observations, climate models, and theoretical understanding to attribute changes in specific processes to forcings. This approach is often used for regional climate phenomena, such as monsoon changes or polar amplification

Extreme Event Attribution assesses the role of human influence in the likelihood of occurrence or intensity of extreme weather events (*e.g.* heat waves or droughts). Methods include:

- Probabilistic Event Attribution uses large ensembles of climate model simulations to compare observed events to model-generated counterfactuals
- Storyline Approach examines the physical processes driving an event and evaluates how anthropogenic forcings might have modified those processes

8.3 Attribution of global warming

Attribution statements for global warming in the three most recent IPCC Assessment reports are:

AR4: **Most of the observed increase** in global average temperatures since the mid-20th century is *very likely* due to the observed increase in anthropogenic greenhouse gas concentrations. (IPCC 2007)

AR5: It is *extremely likely* that **more than half of the observed increase** in global average surface temperature from 1951 to 2010 was caused by the anthropogenic increase in greenhouse gas concentrations and other anthropogenic forcings together. The best estimate of the human-induced contribution to warming is similar to the observed warming over this period. (IPCC 2013)

AR6: The *likely* range of total human-caused global surface temperature increase from 1850–1900 to 2010–2019 is 0.8°C to 1.3°C, with a best estimate of 1.07°C. It is *likely* that well-mixed GHGs contributed a warming of 1.0°C to 2.0°C, other human drivers (principally aerosols) contributed a cooling of 0.0°C to 0.8°C, natural drivers changed global surface temperature by –0.1°C to +0.1°C, and internal variability changed it by –0.2°C to +0.2°C. It is *very likely* that **well-mixed GHGs were the main driver** of tropospheric warming since 1979. (IPCC 2021)

The AR4 and AR5 attribution statements reference the warming since the mid-20th century, the period when greenhouse gas emissions began rapidly increasing. The words “most” and “more than half” are deliberately imprecise, potentially ranging from 51 to 99 percent of the warming – presumably this imprecision is to account for structural uncertainties such as natural internal variability. The confidence level increases from *very likely* to *extremely likely* from AR4 to AR5. The structure of the attribution statement in the AR6 is fundamentally different, referencing the warming to the period 1850–1900. The AR6 attribution statement is more precise numerically, but with a lower level of confidence at “likely” – the AR6 attributes essentially all the warming to increases in greenhouse gases. The most confident statement from the AR6 relates to the tropospheric warming since 1979, using the words “main driver” and “*very likely*.”

There are three areas of substantive criticism of the IPCC’s assessment of the causes of the recent warming: inadequate assessment of natural climate variability, inappropriate statistical methods, and substantial discrepancies between models and observations. The last is discussed in Chapter 5, while this chapter discusses the first two factors. All of these criticisms are relevant to the IPCC’s policy-informing attribution of the recent warming, which also underpins extreme event attribution

8.3.1 Natural climate variability

IPCC AR6 states that natural external drivers since 1850–1900 have changed global surface temperature by –0.1°C to +0.1°C, and internal variability has changed it by –0.2°C to +0.2°C – on average having essentially no net impact on the warming since 1850–1900. As discussed below, this minimal contribution of natural variability has been disputed by several publications that question the magnitudes of solar variability and internal variability from large-scale ocean circulation.

Solar variability

IPCC AR5 concluded that the best estimate of radiative forcing due to Total Solar Irradiance (TSI) changes over the period 1750–2011 was very small (0.05 W/m², Myrhe *et al.*, 2014). IPCC AR6 acknowledges substantially higher values and a much larger range of estimates of changes in TSI over the last several centuries, stating that the TSI between the Maunder Minimum (1645–1715) and the second half

of the twentieth century increased by 0.7–2.7 W/m², a range that includes both low and high variability TSI data sets (Gulev, 2021). However, the recommended forcing dataset for the CMIP6 climate model simulations used in AR6 for attribution studies averages two data sets with low solar variability (Matthes, 2017).

While AR6 shows a substantially greater solar impact than does AR5, the overall impact of solar forcing on the climate was still assessed to be small compared to anthropogenic forcing. However, the impact of solar variations on the climate is uncertain and subject to substantial debate (Lockwood, 2012; Connolly *et al.*, 2021) – something that is not evident from the IPCC assessment reports (Lockwood, 2012; Connolly *et al.*, 2021).

Formatted: Font color: Auto

The change variations of TSI over time remains a challenging problem. Since 1978, there have been direct measurements of TSI from satellites. However, the data exhibits non-negligible inconsistencies, and interpreting any multi-decadal trends in TSI requires comparisons of observations from overlapping satellites. There are several rival composite TSI datasets, disagreeing as to whether TSI increased or decreased during the period 1986–96 (the ACRIM gap; see Chapter 4). Further, the satellite record of TSI is used to calibrate proxy models, whereby past solar variations are inferred from sunspots and cosmogenic isotope measurements (Velasco Herrera *et al.*, 2015).

There is substantial evidence for high solar activity in the second half of the 20th century (starting in 1959) and extending into the 1990's, before a decline in the early 21st century; this period is often termed the “Modern Maximum.” (Chatzistergos *et al.*, 2023; Solanki *et al.*, 2004; Usoskin *et al.*, 2007). However, some scientists have concluded that it is not possible to be confident of any multi-decadal trend in TSI (Schmutz, 2021).

This uncertainty causes some reconstructions of TSI from 1750 to have low variability (implying a very low impact of solar variations on global mean surface temperature) whereas datasets with high TSI variability can explain more than 70 percent of the temperature variability since preindustrial times (Scafetta, 2013; Stefani, 2021). The choice of TSI satellite record used in an analysis can therefore substantially influence how much climate change is attributed to human versus natural forcings.

There is growing evidence that other aspects of solar variability, which are referred to as solar indirect effects, either amplify TSI forcing or are independent of TSI forcing. Scafetta *et al.* (2023) suggests that ~80 percent of solar influence on climate may stem from non-TSI mechanisms. There are numerous candidate processes, including solar ultraviolet changes; energetic particle precipitation; atmospheric-electric-field effect on cloud cover; cloud changes produced by solar-modulated galactic cosmic rays; large relative changes in the magnetic field; and the strength of the solar wind. Such solar indirect effects are not included in climate models, although indirect methods of estimating their impacts suggest they are significant. However, claims of non-TSI mechanisms influencing climate are uncertain and debated.

Natural variability of large-scale ocean circulations

Variations in global mean surface temperature are linked to recurrent large-scale variations in ocean circulation patterns, including the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO), the Pacific Decadal Oscillation (PDO) and the El Niño-Southern Oscillation (ENSO). These circulations influence ocean heat uptake and heat distribution and also influence atmospheric circulation patterns and cloud distributions. There is some debate as to whether these variations are strictly internal to the climate system, or whether this variability can have a solar/astronomical origin or can be influenced by large volcanic eruptions.

While climate models simulate the large-scale ocean circulations and internal climate variability, most models ~~show~~ have too little amplitude compared to observations at multi-decadal frequencies and phasing out-of-sync with the observed climate (Kravtsov *et al.* 2024). Averaging multiple simulations effectively averages out the internal variations, leaving only the forced climate variability (*e.g.* CO₂ forcing). With

most of the modern warming beginning in the late 1970's, the recent 50-year warming is on the same time scale as the multi-decadal oscillations of the AMO and PDO.

Here are summary statements from the IPCC AR5 and AR6 reports:

AR5: Decadal variability in the Pacific, associated with the PDO or IPO [Interdecadal Pacific Oscillation], contributes significantly to regional and global temperature trends, but the relative contributions of internal variability and external forcing are difficult to disentangle in CMIP5 simulations.

AR6: Since AR5, there has been increased understanding of the role of internal variability, such as ENSO, PDO, and AMO, in modulating regional climate trends. However, limitations in simulating the exact timing and amplitude of these modes in CMIP6 models contribute to uncertainties in attributing observed changes to anthropogenic forcing (*high confidence*).

The amplitude of the peak-to-trough impact of the multi-decadal oscillations on global temperatures has been assessed by the IPCC AR6: “The likely range of change due to internal variability is -0.2°C to +0.2°C (IPCC, 2021).” This implies a trough-to-peak change of 0.4°C. Over many centuries, any global temperature changes from the troughs and peaks will cancel out, with little to no net impact.

However, with a nominal timescale of 60-80 years for oscillations such as the AMO and PDO, the timing of the peaks and troughs can be confused with the secular trend. This becomes very relevant for attributing the warming for the past 50 years, when most of the recent warming has occurred. Even if climate models have the correct amplitude of the multidecadal oscillations, the timing of the peaks and troughs is not adequately simulated, with each model and individual ensemble simulating a different phasing. Once the simulations of the ensemble members and different models are averaged, the natural internal variability contribution is averaged out owing to differences in phasing, effectively cancelling the role of natural internal variability in the attribution process.

The time series of global surface temperature anomalies since 1850 (Figure 8.1) shows irregular variations of significant amplitude against the background of an overall warming trend and, after 1976, a pronounced difference in trends between the Northern Hemisphere and the Southern Hemisphere. The period between 1905-1945 shows a strong trend of warming. The following thirty years from 1945-1976 showed slightly declining temperatures. The most recent warming period started in 1977.

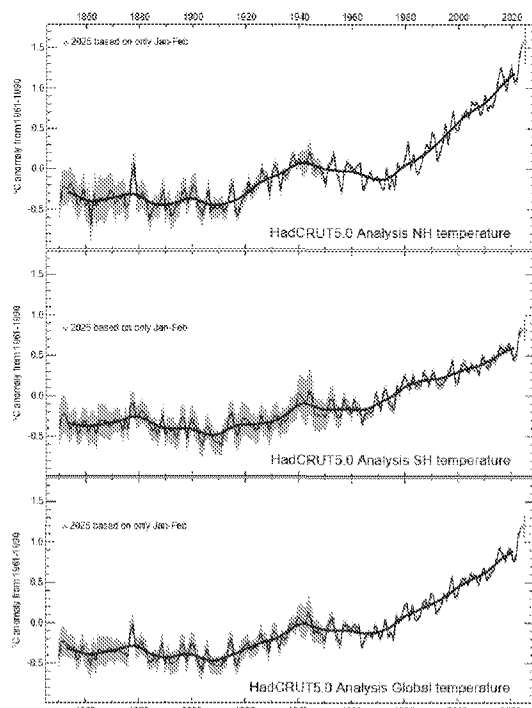


Figure 8.1 Global average surface temperature anomalies 1850—2025. Top: Northern hemisphere. Middle: Southern hemisphere. Bottom: Global average. Source: UK Hadley Centre [[HYPERLINK "https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT5.0Analysis.pdf"](https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT5.0Analysis.pdf)]

The causes of the early 20th century warming are discussed by Hegerl *et al.* (2017; 2019). The atmospheric CO₂ concentration increased from 298 ppm in 1905 to 310 ppm in 1941, implying that CO₂ had little impact. Volcanic activity during this period was very low, and solar forcing is uncertain. Yet Hegerl *et al.* (2017) somehow inferred that 40–54 percent of this warming could be attributed to external forcing, with the rest associated with internal variability. Bronniman *et al.* (2024) focused on the causes of the cooling in the first decade of the 20th century in the Southern Hemisphere. They found that the cooling was related to a La-Niña-like pattern in the Pacific, a cold tropical and subtropical South Atlantic, a cold extratropical South Pacific, and cool southern midlatitude land areas. The Southern Annular Mode was positive, with a strengthened Amundsen–Bellingshausen seas low, although the spread of the data products is considerable.

The warming in the 1930's and subsequent cooling during mid-century was particularly pronounced in the Arctic. Bokuchava and Semenov (2021) find that these variations were most likely caused by a combined effect of long-term natural climate variations in the North Atlantic and North Pacific with a contribution of the natural radiative forcing related to the reduced volcanic activity and variations of solar activity as well as growing greenhouse gases concentrations. Tokinaga *et al.* (2017) showed that the combined effect of internally generated Pacific and Atlantic interdecadal variability intensified Arctic

warming in the early 20th century. The synchronized Pacific-Atlantic warming drastically alters planetary-scale circulations over the Northern Hemisphere; these same circulation patterns have a global influence.

The cooling period between 1945 and 1976 has been referred to as the “grand hiatus.” Numerous causes have been hypothesized: natural internal variability from fluctuations associated with the Pacific Decadal Oscillation and Atlantic Multidecadal Oscillation; cooling from increased emissions of aerosols from industrial activities; increased heat uptake in the Atlantic, Southern and Equatorial Pacific Oceans. Thompson *et al.* (2010) find that the hemispheric differences in temperature trends in the middle of the twentieth century stem largely from a rapid drop in Northern Hemisphere sea surface temperatures of about 0.3 °C between about 1968 and 1972.

The Great Pacific Climate Shift of 1976-1977 was a notable climatic event characterized by an abrupt change in the North Pacific Ocean's atmosphere-ocean system that interacted with global climate patterns. This shift is closely associated with the Pacific Decadal Oscillation (PDO) that oscillates between warm and cool phases over decades. The 1976 shift marked a transition from a predominantly negative (cool) PDO phase (1947–1976) to a positive (warm) phase (1977 through 2000), with significant implications for global and regional climate patterns including the frequencies of El Niño and La Niña events. The Great Pacific Climate Shift coincided with the beginning of a period of accelerated global warming. When the Great Pacific Climate Shift is accounted for in climate attribution analyses since 1950, 40 percent or more of the warming in the second half of the 20th century is attributed to natural internal variability (McLean *et al.*, 2009; Tung and Zhou, 2013; Chylek *et al.*, 2016; Scafetta, 2021).

8.3.2 Optimal fingerprinting

Optimal fingerprinting is a statistical technique introduced by Allen and Tett (1999) that compares observed climate data to climate model simulations to identify patterns (or “fingerprints”) associated with human or natural forcing. It involves taking a vector of observed climate changes, such as warming rates in locations around the world, and decomposing them into a weighted sum of “signals”, which are analogues to the observations generated by climate models with different types of forcings. The weights are chosen using a regression method called Total Least Squares. The analysis commonly uses just two signals, one generated by models using only anthropogenic forcings and one using only natural forcings. If the estimated weighting coefficient attached to a signal is significantly different from zero, then that signal is said to be “detected”. If it is close to 1.0, then the model generating the signal is said to be consistent with observations. If it is less than 1.0, then the model signal for that forcing is too strong and needs to be scaled down, and vice-versa. Both the observed data and the signals are weighted using a model-generated estimate of patterns of randomness in the climate system so as, in principle, to put maximum weight on regions where natural variability is minimized.

Optimal fingerprinting is the primary tool for attribution in the research literature. While it has been widely used and prominently featured by the IPCC since 2001, there is very little literature examining the statistical properties of the results it generates. One of its inherent weaknesses is that results depend on assumptions about the accuracy of climate models, especially regarding their representation of natural variability (IPCC AR5 Ch 10.2.3).

A series of papers by McKittrick (McKittrick 2021, 2022, 2023, 2025) has challenged the optimal fingerprinting method, arguing that it is inherently unreliable and that practices adopted from econometrics can provide more valid results. Statistical theory requires that for regression models to yield unbiased coefficients, a set of assumptions called the Gauss-Markov conditions must hold. McKittrick (2021) argued that the Allen and Tett (1999) methodology violates the Gauss-Markov conditions, leading to potentially biased and inconsistent fingerprinting coefficients, undermining the reliability of the method. Chen *et al.* (2023) confirmed this analysis and although they argued that the method could yield unbiased valid results, but only under very stringent assumptions. McKittrick (2022) and (2023) raised a further concern that climate scientists—

virtually alone among scientific disciplines—have used an estimation method called Total Least Squares (TLS) to estimate anthropogenic greenhouse gas signal coefficients, despite its tendency to be ~~unreliable~~ unstable unless some strong assumptions hold that in practice are unlikely to be true. Under conditions that easily arise in optimal fingerprinting, TLS estimates have a large positive bias. Thus, any study that used TLS for optimal fingerprinting without verifying its applicability in the specific data context has likely overstated the attribution.

McKittrick (2025) presented an empirical example comparing the results of conventional optimal fingerprinting against methods drawn from mainstream econometrics that are known to be valid for the specific application of signal detection. While the IPCC optimal fingerprinting method yields an anthropogenic signal coefficient close to 1.0 on a global temperature data set spanning 1900 to 2010, consistent estimation yields a coefficient around 0.4, which rises to about 0.65 on data spanning 1980 to 2010, implying the model response to greenhouse gases needs to be scaled down by about half to optimally match observations. The natural forcing signal coefficient, by contrast, is between 2.0 and 4.0, implying the climate model signals of natural forcing need to be scaled up two-to four-fold to match observed climate change. The fingerprinting coefficients estimated in McKittrick (2025), when used to scale the average sensitivity of the climate models used to generate the forcing signals in his data set, imply a Transient Climate Sensitivity of 1.4°C, which is consistent with the estimate by Lewis (2023) using a different estimation method and multiple independent data sets.

While these analyses do not falsify all results stemming from the IPCC optimal fingerprinting method, they do challenge the basis on which they were believed to be correct.

8.3.3 Time series methods

The IPCC (AR5 WGI 10.2.2) drew attention to alternative approaches of assessing causality that emerged from the time series econometrics literature. These have the advantage of not depending on assumptions about the accuracy of climate models, but the disadvantage that they depend on difficult-to-test assumptions about the data generating process underlying climate and forcing data. The methods, now referred to as climate econometrics, use the tools of unit root testing, Granger causality and cointegration analysis, all of which are familiar in economics and finance and which are slowly being adopted in climate science. Time series analysis methods hold out the possibility of determining whether anthropogenic or natural forcings are the primary drivers of climate change without requiring the use of climate models, although key questions remain unsettled (e.g. Dergiades *et al.*, 2016, Balcombe *et al.*, 2019, Dagsvik *et al.*, 2020, Razzak, 2022, Dagsvik and Moen, 2023).

“Granger causality” modeling is a tool for determining directions of influence in data series that move together. It is a statistical, not a physical, concept. If knowing the current value of one variable significantly improves the forecast accuracy of another variable, we can infer a causal connection exists; this is called Granger causality. The modeling tools, called vector autoregression, measure direct impulse-response patterns and feedbacks. An application to the well-known Vostok ice core data revealed an error in Al Gore’s documentary *An Inconvenient Truth*. Gore showed the data and drew attention to the coherence of temperature and CO₂ changes over a 440,000 year span, which he asserted was due to CO₂ driving temperature changes. But temperature changes can also affect atmospheric CO₂ levels. Davidson *et al.* (2015) examined the series and found that temperature Granger causes CO₂ but not the reverse. In other words on the time scales represented in the Vostok data the coherence in the series is primarily due to the influence of temperature on CO₂ levels, not the feedback of CO₂ levels on temperature.

In summary, the primary statistical methods for attributing causation in climate data are optimal fingerprinting and time series analysis. Applications of the Allen and Tett (1999) optimal fingerprinting method dominate the attribution literature and have underpinned past IPCC conclusions, but results depend

on the accuracy of climate models and the method has recently been criticized as inherently biased. Time series methods do not depend on climate models but require assumptions of their own and have generated results that have thus far not converged on a consensus.

8.4 Declining planetary albedo and recent record warmth

A sharp recent increase in global average temperatures has raised the question of short-term drivers of climate. One such candidate is the fraction of absorbed solar radiation which has also increased abruptly in recent years. The question to be answered is whether the change is an internal feedback to warming caused by greenhouse gases or whether something else increased the fraction of absorbed radiation which then caused the recent warming.

The albedo is the fraction of incoming solar radiation that is reflected back into space rather than being absorbed by the planet. Highly reflective surfaces like cloud tops and snow and ice are most important in this regard. The Earth's albedo is approximately 30 percent, meaning almost a third of the sunlight that reaches Earth is directly reflected back to space. A lower albedo implies more solar energy is absorbed by the planet to be then re-radiated as heat. Hence, other things being equal, a decline in albedo is associated with a warming of the Earth.

Arguably the most striking change in the Earth's climate system during the 21st century is a significant reduction in planetary albedo since 2015, which has coincided with at least two years of record global warmth. Figure 8.2 shows the planetary albedo variations since 2000, when there are good satellite observations. The 0.5 percent reduction in planetary albedo since 2015 corresponds to an increase of 1.7 W/m² in absorbed solar energy averaged over the planet (Hansen and Karecha, 2025). For comparison, the IPCC estimate of forcing from the increase in atmospheric CO₂ compared to preindustrial times is approximately 2.2 W/m² (Figure 3.1.2).

Looking back prior to 2000 with less adequate data, Goessling *et al.* (2025) assessed that planetary albedo was relatively low around the 1940's and 50's, before rising in industrial aerosol precursor emissions increased albedo until the 1980's. The strongest planetary albedo excursions were high-albedo episodes caused by volcanic eruptions, such as after the Mount Pinatubo eruption in 1991. Although uncertain, the 2023 planetary albedo minimum may have been the lowest since at least 1940.

Changes in surface characteristics ~~can't~~ cannot explain this decrease in planetary albedo since 2015:

- Arctic sea ice extent has declined by about 5 percent since 1980 (https://nsidc.org/data/seaice_index/images/s_plot_hires.png), although following 2007 there has been a pause in the Arctic sea ice decline (England *et al.*, 2025)
- Regarding Antarctic sea ice, the IPCC AR6 concludes that "There has been no significant trend in Antarctic sea ice area from 1979 to 2020 due to regionally opposing trends and large internal variability." (Summary for Policymakers, A.1.5)
- Northern hemispheric annual snow cover has been slowly declining since 1967, with barely significant trends. The data show the Northern Hemisphere has snowier winters, accompanied by more rapid melt in spring and summer. [HYPERLINK "<http://climate.nutgers.edu/snowcover/>"]
- Global greening (Chapter 2) is contributing to the decrease in planetary albedo, as forests have a lower albedo than open lands or snow. However, there is some evidence that forests increase cloud cover (high reflectivity), which counteracts the direct albedo increase associated with increasing forested area.

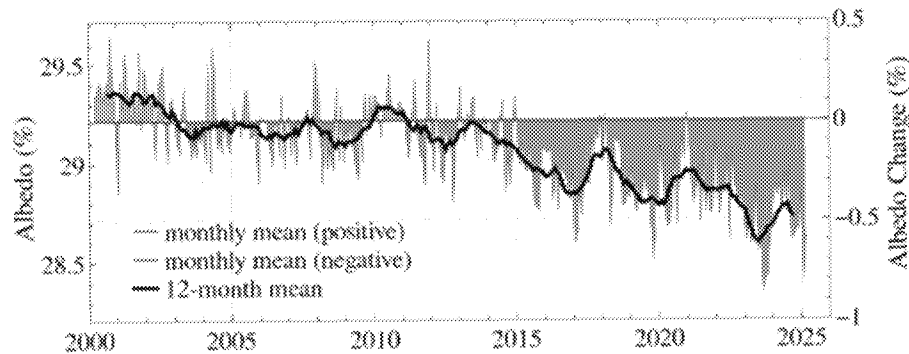


Figure 8.2. Earth's albedo (reflectivity, in percent), with seasonality removed. From Hansen and Karecha (2025)

Changes in surface reflectivity are contributing to a small, slow decline in planetary albedo. However, these changes cannot explain the sharp decline in planetary albedo beginning in 2015. Further, any changes in surface albedo are effectively damped by about a factor 3 on average, primarily due to cloud masking (Loeb *et al.* 2019). Surface albedo changes have thus contributed only weakly to the recent planetary albedo decline, particularly when averaged annually and globally. This leaves the most likely explanation for the sharp albedo decline as changes in atmospheric aerosols and/or clouds.

Aerosols are small particles in the atmosphere that reflect sunlight and can interact with cloud processes to make the clouds more reflective. Aerosols have both natural origins (e.g. dust from soils, wildfires) as well as human origins from combustion (including fossil fuels). Regions that are greening and/or have an increase in rainfall might be producing less dust. For anthropogenic aerosols, new ship fuel regulations aimed at reducing sulfur emissions were implemented in three phases, in 2010, 2015 and 2020. Sulfate particles reflect solar radiation. Cleaner air means less solar radiation is reflected, which contributes to surface warming. Indirect effects of sulfate aerosols include increasing the reflectivity of low-level clouds in the subtropics. There is controversy surrounding the importance of this change in sulfate emissions to the Earth's radiation balance (Hodnebrog *et al.*, 2024; Yuan *et al.*, 2024), but the restriction of this effect to major shipping routes suggests a small global impact (Schmidt, 2024).

Changes in clouds are the primary candidate to explain the decline in global albedo since 2015. Two recent papers (Loeb *et al.*, 2024; Goessling *et al.* 2024) have addressed recent variations in cloud properties. By considering satellite and reanalysis data, Loeb *et al.* found that decreases in low and mid-level clouds since 2015 are the primary reason for decreasing planetary albedo in the Northern hemisphere, whereas in the Southern hemisphere the decrease in planetary albedo is primarily due to decreases in mid-level clouds across all latitude zones. Goessling *et al.* (2024) found that cloud anomalies were mainly due to reduced low-level clouds. Regions with coherent low-level cloud reductions over the past decade include the warm pool region around the Maritime Continent and the northern extratropical western Pacific, as well as large parts of the Atlantic and adjacent land regions. The reduction of global cloud cover identified in these analyses since 2015 is 1-2 percent.

The question then becomes what caused the change in cloud cover. Two causes have been posited for the declining cloud cover over the past decade:

- Natural climate variability

- Changes in low cloud cover associated with warming sea surface temperatures, implying an emerging positive feedback to climate change (Hansen and Karecha, 2025)

The existence of a new positive low cloud feedback that began emerging in 2015 is not easy to justify. However, there are numerous natural climate signals during this period that are associated with atmospheric circulation changes that can influence the distribution of clouds:

- The 2014-2016 was one of the strongest El Niño events on record
- A cold anomaly beginning in 2015 in the subpolar gyre of the North Atlantic reflects a shift in the ocean circulation pattern associated with decadal variability in the Atlantic (Frajka-Williams *et al.*, 2017; Arthun *et al.* 2021).
- The Pacific Decadal Oscillation positive index peaked in 2016, then declined and has been in negative territory since late 2019
- Eruption of the submarine Hunga-Tonga volcano in 2022

Interannual cloud anomalies associated with the El Niño Southern Oscillation (ENSO) have a significant global signal and strong regional signals especially over the tropical Indian and Pacific Oceans.

The Hunga Tonga eruption is remarkable in its coincidence with the exceptionally low value of planetary albedo in 2023. Goessling *et al.* (2024) found that the cloud perturbations in 2023 showed a different pattern from the overall pattern since 2015, with reduced cloud cover being most pronounced in the northern hemisphere and tropics. Regional reductions in cloud cover were most pronounced over the eastern Indian Ocean, over South America and extending over the eastern Pacific, as well as over northern North America, in the Southern Ocean around 60S, in the subtropical and eastern North Atlantic, and in parts of the North Pacific.

The Hunga Tonga eruption was unusual in that it injected large amounts of water vapor into the stratosphere, in addition to sulfate particles. Early publications focused on the impacts to stratospheric circulations and the direct radiative impact. In 2025, papers are emerging that examine the indirect effects of Hunga Tonga on surface climate using ensemble simulations from earth system models (Bednarz *et al.*, 2025; Kuchar *et al.*, 2025). These papers found statistically significant impacts on regional climates that were driven by circulation changes from couplings between the stratosphere and troposphere. These papers indicate the complex interactions between volcanic activity and climate dynamics. More research is needed to untangle any impacts of Hunga Tonga eruption on planetary albedo.

In summary, the decline in planetary albedo and the concurrent decline in cloudiness have emphasized the importance of clouds and their variations to global climate variability and change. A change of 1 to 2 percent in global cloud cover has a greater radiative impact on the climate than the direct radiative effect of doubling CO₂. While it is difficult to untangle causes of the recent trend, the competing explanations for the cause of the declining cloud cover have substantial implications for assessing the Equilibrium Climate Sensitivity and also for the attribution of the recent warming. An additional 10 years of data should help clarify whether this is a strong positive cloud feedback associated with warming, or a temporary fluctuation driven by natural variability

8.5 Attribution of climate impact drivers

The IPCC (Ranasinghe *et al.* 2021) defines “climate impact drivers” or CIDs as “physical climate system conditions (e.g., means, events, extremes) that affect an element of society or ecosystems.” Hence CIDs are those features of the weather and climate system of primary interest in assessing the impacts of climate change since they potentially affect humans and the natural world. For instance, under the heading “Heat and Cold,” CIDs are identified as mean air temperature, extreme heat, cold spells and frost. The IPCC

also points out that CIDs are not necessarily harm-related: depending on the system in question they can be detrimental, neutral, beneficial or a combination.

The first column of Table 12.12 in Ranasinghe *et al.* (2021, p. 1856), reproduced here as Table 8.1, summarizes the AR6 assessment of whether a signal of attributable anthropogenic influence has emerged across all major CIDs. One of the themes of this chapter is that attribution methods used by the IPCC tend to overstate the anthropogenic influence and understate the role of natural variability. Nonetheless a striking feature of that summary table is how few CIDs exhibit an anthropogenic signal sufficient to distinguish them from natural variability.

Out of the 33 weather impact categories an anthropogenic signal is asserted with *high confidence* in only five, and with *medium confidence* in a further four. (Note that one of the CIDs is an increase in CO₂ levels, and since it is a tautology to attribute this to increased CO₂ levels this CID can be ignored.) For the rest the IPCC does not claim to have detected anthropogenic drivers. Of the five *high confidence* assertions, two are for changes in average temperatures (air and ocean) hence are not measures of extreme weather. Further, two of the four *medium confidence* assertions are related to ocean chemistry and thus are likewise not related to extreme weather. The IPCC does not assert a human influence on many non-temperature weather features such as wind, precipitation, flooding, drought etc.

Columns 2 and 3 of IPCC Table 12.12 report on whether anthropogenic signals are expected to emerge this century under RCP8.5, the most extreme forcing scenario. We have omitted these columns for several reasons. First, because they refer to whether climate models project detectable signals in the observations, which is a very different question than our concern here, whether a signal has been detected in historical data. Second, as we discuss in Chapter 4, the RCP8.5 scenario is a misleading and implausible high-end storyline, it is not a “base case” or business-as-usual projection. Third, the ensemble of detailed models is acknowledged (Palmer and Stevens 2019) to be “not fit for purpose” in describing regional changes and “unable to represent future conditions at the degree of spatial, temporal, and probabilistic precision with which projections are often provided.” (Nissan et al, 2019). Even with these caveats, we note that the omitted columns in AR6 Table 12.12 show most weather impacts are not expected to exhibit an anthropogenic signal this century.

Climatic Impact-driver Type	Climatic Impact-driver Category	Already Emerged in Historical Period
Heat and Cold	Mean air temperature	1
	Extreme heat	2
	Cold spell	4
	Frost	
Wet and Dry	Mean precipitation	
	River flood	
	Heavy precipitation and pluvial flood	
	Landslide	
	Aridity	
	Hydrological drought	
	Agricultural and ecological drought	
	Fog weather	
Wind	Mean wind speed	
	Severe wind storm	
	Tropical cyclone	
	Sand and dust storm	
Snow and Ice	Snow, glacier and ice sheet	
	Permafrost	
	Lake, river and sea ice	11
	Heavy snowfall and ice storm	
	Hail	
	Snow avalanche	
Coastal	Relative sea level	
	Coastal flood	
	Coastal erosion	
Open Ocean	Mean ocean temperature	
	Marine heatwave	
	Ocean acidity	
	Ocean salinity	13
	Dissolved oxygen	14
Other	Air pollution weather	
	Atmospheric CO ₂ at surface	
	Radiation at surface	

High confidence of decrease

Medium confidence of decrease

Low confidence in direction of change

Medium confidence of increase

High confidence of increase

Table 8.1: Reproduction of column 1 of Table 12.12, IPCC AR6 Working Group I report. Emergence of anthropogenic signal in historical period for CIDs shown. White: no signal detected. Blue and orange: change detected (decrease or increase) and confidence level as indicated in color legend.

As discussed in Chapter 6 natural variability dominates patterns of extreme weather systems and simplistic assertions of trend detection are frequently undermined by regional heterogeneity and trend reversals over time. Table 8.1 makes the related point that, again contrary to popular belief, attribution of changes in most extreme weather types to human influence is not currently possible. Taking wind as an example, the IPCC claims that an anthropogenic signal has not emerged in average wind speeds, severe windstorms, tropical cyclones or sand and dust storms, nor is one expected to emerge this century even under an extreme emissions scenario. The same applies to drought and fire weather.

8.6 Extreme event attribution (EEA)

Examining the IPCC's treatment of extreme weather and climate event attribution more broadly, the AR6 provides an ambiguous assessment of the role of anthropogenic warming that differs between chapters. Chapter 11 of WG1 states (Seneviratne *et al.*, 2021):

Evidence of observed changes in extremes and their attribution to human influence (including greenhouse gas and aerosol emissions and land-use changes) has strengthened since AR5, in particular for extreme precipitation, droughts, tropical cyclones and compound extremes (including dry/hot events and fire weather). Some recent hot extreme events would have been extremely unlikely to occur without human influence on the climate system.

By contrast, as noted above in Section 8.5, Chapter 12 of WG1 (Table 12.12) paints a different picture – presumably, the expert judgment of different groups of authors for the two chapters came to different conclusions (Ranasinghe, 2021):

- High confidence in an increase in extreme heat events in tropical regions where observations allow trend estimation and in most regions in the mid-latitudes, medium confidence elsewhere
- Medium confidence in a decrease in extreme cold events in Australia, Africa and most of northern South America where observations allow trend estimation
- No evidence of emergence in the historical period of a change in river floods, heavy precipitation, drought, fire weather, severe wind storms, and tropical cyclones

While the overall issue of detecting changes in extreme weather events and their attribution remains ambiguous, most of the activity in this area relates to the attribution of particular extreme weather events. The most prominent effort is World Weather Attribution (WWA; worldweatherattribution.org), an international research initiative for extreme event attribution that purports to analyze how climate change influences the likelihood and intensity of extreme weather events. Their approach is to use large ensembles of regional climate models to compare an event in today's climate with one in a counterfactual pre-industrial climate without human influences.

WWA has a prominent public presence in linking extreme weather to climate change, with its press releases attracting considerable attention in public and policy discussions. However, the WWA's extensive promotion of non-peer-reviewed findings, its funding ties, its open admission to shaping analyses to serve litigation, and its methodological challenges have sparked controversies, with critics questioning the robustness and impartiality of their conclusions (Pielke Jr. 2024). Despite these issues, WWA's work continues to influence climate science and media narratives. Technical criticisms of the approach include a lack of a formal detection process; an implicit assumption that 100 percent of the post-industrial warming is caused by greenhouse gases; and a failure to adequately account for internal climate variability.

Because EEA is relatively new, many basic methodological issues have yet to be settled in the expert literature. An important challenge is the lack of data. Extreme events are, by definition, rare. Many analyses of extreme event types (including the U.S. National Assessment Reports) only evaluate data since 1950 or 1970. However, as emphasized by Chapter 6, many of the worst extreme weather and climate events in U.S. history occurred prior to the first half of the 20th century, including in the early 19th century. And if paleoclimate reconstructions are considered, it becomes very difficult for an event to pass the detection thresholds of exceeding what is expected from natural variability, particularly if a reasonably sized geographic region is considered.

Another challenge is defining the event under study. There is a longstanding literature in statistics and econometrics on the challenge of analyzing data with outliers. The issue arises because a data series establishes a probability distribution defining the expected range of observations. If an outlier is observed it might indicate that the underlying process giving rise to the data distribution has changed (which in the weather context would mean that a climate change has been detected) or that the underlying process has multiple regimes each with a different probability distribution, in which case observing an outlier simply means we were temporarily in a different regime, but the system itself was unchanged. If a time series contains only a single outlier event at the end of the series it is not possible to determine which model is the correct one (Chen and Liu 1993). For instance, there might be an “ordinary” weather regime that yields a distribution of summer daytime highs in a particular coastal region, and a second “heatwave” regime that kicks in when an inland blocking event occurs, which yields a temperature distribution centered 15°C higher than the first one. A day with temperatures 13°C above normal would either be an extreme heat anomaly under the first regime or a somewhat cool event under the second, and we have no way in this case of knowing on statistical grounds which view is correct.

Visser and Petersen (2012) and Sardeshmukh *et al.* (2015) both point out that different distributions may fit observed data equally well but yield very different implications about the likelihood of a specific weather event. Visser and Petersen argue that, in view of the deep uncertainties of extreme weather analysis, drawing a connection between individual events and global climate change should be avoided. Furthermore, the existence of an outlier at the end of a data series poses the problem that estimates of the event probabilities will be biased whether the outlier is included or excluded (Barlow *et al.*, 2020). Methods to eliminate the bias have not yet been established, leading some experts (e.g. Miralles and Davison 2023) to argue that in settings in which a data series contains a single extreme event at the end, estimation of a return period for the extreme event will be so biased and uncertain that it should be avoided altogether.

We provide a case study of a recent high impact extreme event in the U.S. to illustrate the challenges and ambiguities in attributing the frequency and intensity of extreme weather events to human-caused warming.

8.6.1 Case study – 2021 Western North America heat wave

The 2021 Western North America heat wave was an extreme event that affected much of Western North America in late June 2021. In particular, surface temperature records were set in Portland, OR (116°F; previous record 107°F) and Seattle, WA (108 °F; previous record 103°F) (Mass *et al.*, 2024).

The WWA team generated international headlines with their analysis, which provided the following attribution statements (WWA, 2021; Philip *et al.*, 2022):

- Based on observations and modeling, the occurrence of this heatwave was virtually impossible without human-caused climate change.
- The event is estimated to be about a one in 1000-year event in today’s climate.
- The event would have been at least 150 times rarer without human-induced climate change.
- This heatwave was about 2°C hotter than it would have been if it had occurred at the beginning of the industrial revolution (when global mean temperatures were 1.2°C cooler than today).

But an important counter to the first claim is that other researchers concluded from historical weather data that while a heat wave of the magnitude observed was indeed virtually impossible without anthropogenic climate change, it was also virtually impossible *with* climate change. Bercos-Hickey (2022) noted “these temperatures were virtually impossible under any previously experienced meteorological conditions, with or without global warming.” McKinnon and Simpson (2022) stated “the most likely explanation remains that the weather event itself was ‘bad luck.’” The 2023 Oregon Climate Assessment (Fleischman, 2023) concluded that the heat dome would have formed even without climate change and “There is no evidence that the highly unusual combination of weather features that drove the heat dome were made more likely by climate change, and climate models do not project an increase in the frequency of high-pressure ridges over the Pacific Northwest” (Fleischman, 2023, p. 49).

Mass *et al.* (2024) summarizes the proximate sequence of compound events leading to the heat wave. There was a record-breaking mid-tropospheric ridge over the Pacific Northwest, forced by a tropical disturbance in the western Pacific. This produced record-breaking mid-tropospheric temperatures, strong subsidence in the lower atmosphere, low-level easterly flow that produced downslope warming on regional terrain and the removal of cooler marine air, and an approaching low-level trough that enhanced downslope flow. The event occurred at a time of maximum solar insolation, and drier-than-normal soil moisture. Using a storyline approach, Mass *et al.* assessed that there is no trend in drought and dry soils in the Pacific Northwest; there is no evidence of global warming producing stronger ridges of high pressure, and no observed trend in heat waves or record temperatures in the region. They concluded that although anthropogenic warming might have contributed as much as 2°F to the magnitude of the event, there is little evidence of further amplification of the event from increasing greenhouse gases.

Bercos-Hickey *et al.* (2022) conducted a statistical analysis of a model-based attribution study of this heat wave. Because the event is a far outlier and far above the bounds of Generalized Extreme Value distributions fitted from historical data, they concluded that estimates of return times, quantitative changes in event magnitude and frequency, and probability of the extreme temperatures such as provided by the WWA are not accurate and should be interpreted as having low confidence. They found that hindcast attribution methods using an ensemble of regional climate models, combined with Pearl (2009) causal inferences, can provide limited and conditional information about the magnitude of the human influence on this heatwave - they provided a more highly constrained estimate that human activities caused a ~1.4°F–1.8°F increase in the daily maximum temperatures.

Zeder *et al.* (2023) also concluded that the methods employed by Philip *et al.* (2022, the WWA analysis) tend to overstate the rarity of extreme heat waves, leading to a biased perception of the effect of climate change on the heatwave event: “The tendency to overestimate the return period of observed extreme heatwave events may fuel the impression that seemingly impossible heatwave extremes are currently clustering at an unprecedented rate.”

The 2021 Western North America heatwave was a rare and unprecedented compound weather event that broke century-old temperature records by as much as 9°F. While the WWA team received worldwide publicity for their rapid attribution claims blaming anthropogenic climate change, subsequent peer-reviewed analyses showed that the event was caused by rare meteorological conditions that were not made more probable by global warming.

References

- Allen, M. R., & Tett, S. F. B. (1999). Checking for model consistency in optimal fingerprinting. *Climate Dynamics*, 15(6), 419–434. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1007/s003820050291>"]
- AR4: Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. [HYPERLINK "<http://www.ipcc.ch>"].

- AR5: *Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report* (2021) Working Group I Contribution. [HYPERLINK "<http://www.ipcc.ch>"].
- AR6: *Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report* (2021) Working Group I Contribution. [HYPERLINK "<http://www.ipcc.ch>"].
- Arthun, M, RCJ Willis, HL Johnson, L Chafik, HR Langehaug (2021) Mechanisms of Decadal North Atlantic Climate Variability and Implications for the Recent Cold Anomaly. *Journal of Climate*, Vol 34
- Balcombe, Kevin, Iain Fraser and Abhijit Sharma (2019) Is radiative forcing cointegrated with temperature? A further examination using a structural time series approach." *Management of Environmental Quality* 30(5) DOI 10.1108/MEQ-12-2018-021.
- Barlow, Anna Maria, Chris Sherlock and Jonathan Tawn (2020) Inference for Extreme Values Under Threshold-Based Stopping Rules. *Journal of the Royal Statistical Society Series C* August 2020, Pages 765–789, [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1111/rssc.12420>"]
- Bednarz, EW, AH Butler, X Wang, Z Zhou, W Yu, G Stenchikov, M Toohey, Y Zhu (2025) Indirect climate impacts of the Hunga eruption. Preprint, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1970>
- Bercos-Hickey, E., et al. (2022). Anthropogenic contributions to the 2021 Pacific Northwest heatwave. *Geophysical Research Letters*, 49(23), e2022GL099396. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1029/2022GL099396>"]
- Bokuchava, DD and VV Semenov (2021) Mechanisms of the early 20th century warming in the Arctic. *Earth-Science Reviews*, 222, 103820
- Chatzistergos, T., Krivova, N. A., & Yeo, K. L. (2023). Long-term changes in solar activity and irradiance. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 252, 106150. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106150>"]
- Chen, C., & Liu, L.-M. (1993). Joint estimation of model parameters and outlier effects in time series. *Journal of the American Statistical Association*, 88(421), 284–297. [HYPERLINK "<http://www.jstor.org/stable/2290724>"]
- Chen, L., J.J. Dolado, J. Gonzalo and A. Ramos (2023) Heterogeneous predictive association of CO2 with global warming. *Economica* 2023 90:1397–1421 DOI: 10.1111/ecca.12491
- Chylek, P., et al. (2016). The role of Atlantic Multi-Decadal Oscillation in the global mean temperature variability. *Climate Dynamics*, 47(9–10), 3271–3279. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1007/s00382-016-3025-7>"]
- Connolly, R., et al. (2021). How much has the sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 21(6), 131. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1088/1674-4527/21/6/131>"]
- Cramer, W., et al. (2014). Detection and attribution of observed impacts. In C. B. Field et al. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects* (pp. 979–1037). Cambridge University Press.
- Dagsvik, JK SH Moen (2023) To what extent are temperature levels changing due to greenhouse gas emissions? Statistics Norway Discussion Paper 1007 September 2023
- Dagsvik, JK, M Fortuna and SH Moen (2020) How Does Temperature Vary Over Time?: Evidence on the Stationary and Fractal Nature of Temperature Fluctuations. *Journal of the Royal Statistical Society Series A: Statistics in Society*, Volume 183, Issue 3, June 2020, Pages 883–908, [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1111/rssa.12557>"]
- Davidson, James E.H., David B. Stephenson and Alemtsehai A. Tursie (2015) Time series modeling of paleoclimate data *Environmetrics* 27(1) [HYPERLINK "<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/env.2373>"]

- Dergiades, T., R.K. Kaufmann and T. Panagiotidis (2016). Long-run changes in radiative forcing and surface temperature: The effect of human activity over the last five centuries. *Journal of Environmental Economics and Management* 76:67–85. [[HYPERLINK "https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0095069615000911"](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0095069615000911)]
- England, Mark, Lorenzo M Polvani, James A Screen, et al (2025). Surprising, but not unexpected, multi-decadal pause in Arctic sea ice loss. *ESS Open Archive*. March 29, 2025.
- Fleishman, E., editor. (2023). Sixth Oregon Climate Assessment. Oregon Climate Change Research Institute, Oregon State University, Corvallis, Oregon. [[HYPERLINK "https://blogs.oregonstate.edu/occri/oregon-climate-assessments"](https://blogs.oregonstate.edu/occri/oregon-climate-assessments)]
- Frajka-Williams, E, C Beaulieu, Aurelie Duchez (2017) Emerging negative Atlantic Multidecadal Oscillation index in spite of warm subtropics. *Scientific Reports*, 7:11224
- Goessling, Helge F. Thomas Rackow and Thomas Jung (2024) Recent global temperature surge intensified by record-low planetary albedo. *Science* Vol 387, Issue 6729 pp. 68-73 [[HYPERLINK "https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.adq7280"](https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.adq7280)]
- Gulev, S. K., et al. (2021). Changing state of the climate system. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 287–422). Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Hansen J and P Karecha (2025) Large cloud feedback confirms high sensitivity.
- Hegerl, G. C., et al. (2007). Understanding and attributing climate change. In S. Solomon et al. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 663–745). Cambridge University Press.
- Hegerl, GC, S Bronniman, A Schurer et al. (2017) Early 20th century warming: Anomalies, causes and consequences. *WIREs Climate Change*, DOI: 10.1002/wcc.522
- Hegerl, GC, S Bronniman, T Cowan (2019) Causes of climate change over the historical record. *Environmental Research Letters*, 14, 123006
- Hodnebrog, Ø et al. (2024), Recent reductions in aerosol emissions have increased Earth's energy imbalance. *Communications Earth and Environment* 5, 166 (2024). doi:10.1038/s43247-024-01324-8
- Houghton, J. T., et al. (Eds.). (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1–881). Cambridge University Press. [[HYPERLINK "https://mailchi.mp/caa/large-cloud-feedback-confirms-high-climate-sensitivity"](https://mailchi.mp/caa/large-cloud-feedback-confirms-high-climate-sensitivity)]
- Kravtsov, S, Westgate, A., & Gavrilo, A. (2024). Global-scale multidecadal variability in climate models and observations, part II: The stadium wave. *Climate Dynamics*, 62, 10281–10306. [[HYPERLINK "https://doi.org/10.1007/s00382-024-07451-4"](https://doi.org/10.1007/s00382-024-07451-4)]
- Kuchar, A., Sukhodolov, T., Chiodo, G., Jörimann, A., Kult-Herdin, J., Rozanov, E., and Rieder, H. H. (2025): Modulation of the northern polar vortex by the Hunga Tonga–Hunga Ha'apai eruption and the associated surface response, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25, 3623–3634, [[HYPERLINK "https://doi.org/10.5194/acp-25-3623-2025"](https://doi.org/10.5194/acp-25-3623-2025)].
- Lewis, Nicholas (2023) "Objectively Combining Climate Sensitivity Evidence," *Climate Dynamics* 61, no. 9–10 (2023): 3155–3163, [[HYPERLINK "https://doi.org/10.1007/s00382-022-06398-8"](https://doi.org/10.1007/s00382-022-06398-8)].
- Lockwood, M. (2012). Solar influence on global and regional climates. *Surveys in Geophysics*, 33(3–4), 503–534. [[HYPERLINK "https://doi.org/10.1007/s10712-012-9181-3"](https://doi.org/10.1007/s10712-012-9181-3)]

- Loeb, N. G. *et al.* (2019) Decomposing Shortwave Top-of-Atmosphere and Surface Radiative Flux Variations in Terms of Surface and Atmospheric Contributions. *Journal of Climate* 32(16), 5003-5019 (2019). doi:10.1175/JCLI-D-18-0826.1
- Loeb, N., S-H Ham, RP Allen, TJ Thorsen, B Meyssignac, S Kato, GC Johnson, JL Lyman (2024) Observational Assessment of Changes in Earth's Energy Budget since 2000. *Surveys in Geophysics*, 45, 1757-1783
- Mass, C., *et al.* (2024). The Pacific Northwest heat wave of 25–30 June 2021: Synoptic/mesoscale conditions and climate perspective. *Weather and Forecasting*, 39(2), 275–291. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1175/WAF-D-23-0154.1>"]
- Matthes, K., *et al.* (2017). Solar forcing for CMIP6 (v3.2). Geoscientific Model Development, 10(6), 2247–2302. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.5194/gmd-10-2247-2017>"]
- McKinnon, K. and I. Simpson (2022) How Unexpected Was the 2021 Pacific Northwest Heatwave? *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL100380. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1029/2022GL100380>"]
- McKinnon, K. and I. Simpson (2022) How Unexpected Was the 2021 Pacific Northwest Heatwave? *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL100380. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1029/2022GL100380>"]
- McKittrick, R. (2021). Checking for model consistency in optimal fingerprinting: A comment. *Climate Dynamics*, 58(1–2), 405–411. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1007/s00382-021-05913-7>"]
- McKittrick, R. (2023). Total least squares bias in climate fingerprinting regressions with heterogeneous noise variances and correlated explanatory variables. *Environmetrics*, 35(2), e2835. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1002/env.2835>"]
- McKittrick, Ross R (2022) [HYPERLINK "<https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-022-06315-z>"] *Climate Dynamics* 10.1007/s00382-022-06315-z
- McKittrick, Ross R (2025) Consistent Climate Fingerprinting. *Climate Dynamics* forthcoming preprint available at [HYPERLINK "<http://www.rossmckittrick.com>"]
- McLean, J.D., C. R. de Freitas, and R. M. Carter, (2009) "Influence of the Southern Oscillation on Tropospheric Temperature," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 114, no. D14 (July 23, 2009): D14104, <https://doi.org/10.1029/2008JD011637>.
- Miralles, O., & Davison, A. (2023). Timing and spatial selection bias in rapid extreme event attribution. *Weather and Climate Extremes*, 41, 100...
- Miralles, Ophélie and Anthony Davison (2023) Timing and spatial selection bias in rapid extreme event attribution. *Weather and Climate Extremes* 41 100584 [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100584>"]
- Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, *et al.* (2013): Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Nissan, Hannah, Lisa Goddard, Erin Coughlan de Perez, *et al.* (2019) On the use and misuse of climate change projections in international development. *Wires Climate Change* 14 March 2019 [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1002/wcc.579>"]
- Palmer, Tim N and Bjorn Stevens (2019) The scientific challenge of understanding and estimating climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116 (49) 24390-24395 [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1073/pnas.1906691116>"]
- Pearl, J. (2009). Causality. Cambridge University Press.

- Philip, S. Y., *et al.* (2022). Rapid attribution analysis of the extraordinary heatwave on the Pacific coast of the U.S. and Canada June 2021. *Earth System Dynamics*, 13(4), 1689–1713. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.5194/esd-13-1689-2022>"]
- Pielke Jr., Roger (2024) Weather Attribution Alchemy. Substack essay [HYPERLINK "<https://rogerpielkejr.substack.com/p/weather-attribution-alchemy>"]
- Ranasinghe, R., Ruane, A. C., Vautard, R., Arnell, N., Coppola, E., Cruz, F. A., ... Zaaboul, R. (2021). Chapter 12: Climate change information for regional impact and for risk assessment. In V. Masson-Delmotte *et al.* (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1767–1926). Cambridge University Press. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1017/9781009157896.014>"]
- Razzak, Weshah A. (2022). "The Econometrics of Global Warming," *Journal of Economics and Econometrics*, vol. 65(2), pages 13-47.
- Sardeshmukh, P. D., Compo, G. P., & Penland, C. (2015). Need for caution in interpreting extreme weather statistics. *Journal of Climate*, 28(23), 9166–9187. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0020.1>"]
- Scafetta, N. (2013). Discussion on climate oscillations: CMIP5 general circulation models versus a semi-empirical harmonic model based on astronomical cycles. *Earth-Science Reviews*, 126, 321
- Scaffeta, Nicola (2021) "Reconstruction of the Interannual to Millennial Scale Patterns of the Global Surface Temperature," *Atmosphere* 12, no. 2: 147, [HYPERLINK "<https://doi.org/10.3390/atmos12020147>"]
- Schmidt, G. (2024) Climate models can't explain 2023's huge heat anomaly — we could be in uncharted territory. *Nature* 627, 467. [HYPERLINK "<https://www.nature.com/articles/d41586-024-00816-z>"]
- Schmutz, Werner K. (2021) "Changes in the Total Solar Irradiance and Climatic Effects," *Journal of Space Weather and Space Climate* 11: 40, <https://doi.org/10.1051/swsc/2021016>.
- Seneviratne, S. *et al.* (2021) "Chapter 11: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate." In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, *et al.*, 1513–1766. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>.
- Solanki, S.K. *et al.* (2004), "Unusual Activity of the Sun during Recent Decades Compared to the Previous 11,000 Years," *Nature* 431, no. 7012 (October 28, 2004): 1084–1087, [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1038/nature02995>"].
- Stefani, Frank (2021) "Solar and Anthropogenic Influences on Climate: Regression Analysis and Tentative Predictions," *Climate* 9, no. 11 (November 3, 2021): 163, [HYPERLINK "<https://doi.org/10.3390/cli9110163>"].
- Thompson, DJW, JM Wallace, JJ Kennedy, PD Jones (2010) An abrupt drop in Northern Hemisphere Sea Surface Temperature around 1970. *Nature*, 467, 444-447
- Tokinaga, H, SP Xie, and H Mukougawa (2017) Early 20th century Arctic warming intensified by Pacific and Atlantic multidecadal variability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114, 6227-6233 [HYPERLINK "<https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1615880114>"]
- Tung, Ka-Kit and Jiansong Zhou (2013) "Using Data to Attribute Episodes of Warming and Cooling in Instrumental Records," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, no. 6 (January 23, 2013): 2058–2063, <https://doi.org/10.1073/pnas.1212471110>.

- Usoskin, I.G., S. K. Solanki, and G. A. Kovaltsov (2007) “Grand Minima and Maxima of Solar Activity: New Observational Constraints,” *Astronomy & Astrophysics* 471, no. 1 (June 6, 2007): 301–309, [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077704>"].
- Velasco Herrera, V.M., B. Mendoza, and G. Velasco Herrera (2015) “Reconstruction and Prediction of the Total Solar Irradiance: From the Medieval Warm Period to the 21st Century,” *New Astronomy* 34 (January 2015): 221–233, <https://doi.org/10.1016/j.newast.2014.07.009>.
- Visser, H. and A.C. Petersen (2012) Inferences on weather extremes and weather-related disasters: a review of statistical methods *Climates of the Past* 8, 265–286 [HYPERLINK "<https://cp.copernicus.org/articles/8/265/2012/cp-8-265-2012.pdf>"]
- World Weather Attribution (2021) “Western North American Extreme Heat Virtually Impossible without Human-Caused Climate Change.” July 7, 2021. <https://www.worldweatherattribution.org/western-north-american-extreme-heat-virtually-impossible-without-human-caused-climate-change/>.
- Yuan, *et al.* (2024) Abrupt reduction in shipping emission as an inadvertent geoengineering termination shock produces substantial radiative warming. *Communications Earth and Environment* 5, 281 (2024). doi:10.1038/s43247-024-01442-3
- Zeder, J., Sippel, S., Pasche, O. C., Engelke, S., & Fischer, E. M. (2023). The effect of a short observational record on the statistics of temperature extremes. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL104090. [HYPERLINK "<https://doi.org/10.1029/2023GL104090>"]

OUO – Official Use Only

PART III: IMPACTS ON ECOSYSTEMS AND SOCIETY

9 CLIMATE CHANGE AND U.S. AGRICULTURE

Chapter summary

There has been abundant evidence going back decades that rising CO₂ levels benefit plants, including agricultural crops, and that CO₂-induced warming will be a net benefit to U.S. agriculture. The warming since 1981, in combination with adaptive behavior by farmers, has been beneficial for maize. The increased ambient CO₂ has also boosted productivity of all major U.S. crop types. Various attempts to argue that CO₂-induced warming will harm agriculture do not hold up under scrutiny.

9.1 Econometric analyses

Econometric analyses of the effects of climate change on agriculture have sought to integrate information about long term crop yield changes in response to temperature and precipitation changes under assumptions about adaptive behavior by farmers. One method focuses on variations in agricultural land values. The rationale is that if climate change is a long-term net benefit for agriculture it should be capitalized into higher market values for agricultural land, and vice versa. While individual crops might benefit from or be harmed by climate change, once the adaptive responses of farmers are considered the value of farmland represents an index of whether the changes are expected to be beneficial or not. Mendelsohn *et al.* (1994) examined the relationship between historical climatic variations on agricultural land values and concluded global warming would be slightly beneficial to American agriculture.

The Mendelsohn *et al.* method, called Ricardian analysis after David Ricardo, the 19th century British economist who pioneered the study of land values, attracted subsequent criticism from authors who argued it failed to account for differences in land values attributable to fixed locational characteristics like soil quality, and non-climatic changes including nearby urbanization. Deschênes and Greenstone (2007) looked at agricultural profits instead of land values and reached conclusions similar to Mendelsohn *et al.* (1994), namely that past climatic variations had relatively little effect on farm profitability and that warming would likely yield small overall benefits for the U.S. agricultural sector. However, a subsequent exchange with critics led them (Deschênes and Greenstone 2012) to revise their conclusions and project potentially large losses in U.S. agriculture due to climate warming.

Burke and Emerick (2016) looked at temperature variations over 1980 to 2000 and argued that farmers were not as able to adapt to temperature changes as the Ricardian method assumes and that climate change would have large negative impacts on corn and soy yields. Schlenker and Roberts (2009) similarly argued that yield gains to past warming would not carry over to the future and corn and soy yields would sharply decrease this century due to climate change.

Two recent studies have argued that pessimistic findings such as these are not robust. Ortiz-Bobea (2019) argued that land values aggregate farm and non-farm influences and the latter need to be filtered out. He developed a data set using cash rents for agricultural activity as a measure of land value specifically for farming activity. Whereas the land value model implied future losses under climate warming, the same model estimated using cash rents did not, leading the author to conclude the pessimistic results were due to using an inaccurate measure of the returns to farming activity. Bareille and Chakir (2023) assembled a large data base on farm sale prices in France for properties that sold twice between 1996 and 2019. They could replicate pessimistic results showing negative effects of warming on agricultural land values using conventional econometric modeling. But by taking advantage of the repeat sales data, which provides information on site-specific changes in land prices, they found the results reversed and implied that climate change will be very beneficial for French agriculture. The authors concluded that, taking adaptation into account, a warming climate would yield positive benefits for French agriculture that were between two and

20 times larger than had previously been estimated. On average, with full adaptation, they concluded that climate changes under the medium RCP4.5 scenario could double the value of French farmland by 2100.

A major deficiency of all these studies, however, is that they omit the role of CO₂ fertilization. Climate change as it relates to this report is caused by GHG emissions, chiefly CO₂. The econometric analyses referenced above focus only on temperature and precipitation changes and do not take account of the beneficial growth effect of the additional CO₂ that drives them. As explained in Chapter 2, CO₂ is a major driver of plant growth, so this omission biases the analysis towards underestimation of the benefits of climate change to agriculture.

9.2 Field studies of CO₂ enrichment

One of the ways the effect of CO₂ on crop growth has been studied is through “free air enrichment experiments” or FACE plots, in which small sources of CO₂ are placed in fields surrounding plants and the growth response to elevated CO₂ under varying weather conditions are recorded. Ainsworth *et al.* (2020) summarizes results from about 250 such studies. They found that elevation of CO₂ by 200 ppm caused an average 18 percent increase in crop yield in C3 plants. C4 plants exhibited benefits mainly under drought conditions.

In addition to FACE plot experiments there have been thousands of laboratory experiments on the effects of CO₂ on all kinds of plant growth. Here we review some of the results on key U.S. agricultural crops.

Soybean

Studies on the impact of elevated CO₂ on Soybean (*Glycine max*(L.) Merr.) plants in the water-deficient region of Huang-Huai-Hai Plain, China, showed that elevated CO₂ concentrations improved photosynthesis rate, water use efficiency, and growth Li (2013) under both normal conditions and drought conditions. The CO2Science.org website reports on 108 published experiments between 1985 and 2019 exposing soybean to enriched CO₂ levels. Converted to a +300ppm common scale the average growth benefit was +50.9 percent. There were also ten studies reporting on +600 ppm CO₂ enrichment, which increased photosynthesis by an average of 90.3%.

Maize (corn)

The CO2Science.org website reports on 28 published experiments between 1983 and 2018 exposing corn (*Zea mays* L.) to enriched CO₂ levels. Converted to a +300ppm common scale the average growth benefit was +23.7 percent. Corn also benefits from increased drought tolerance under elevated CO₂. An experimental study (Allen Jr., 2011) exposed plants to water stress conditions in sunlit controlled-environment chambers at 360 ppm (ambient) and 720 ppm (elevated) CO₂. The drought stress caused a 41 percent loss of growth under ambient CO₂ but only a 13 percent loss under elevated CO₂.

Wheat

The CO2Science.org website reports on 92 published experiments between 1983 and 2020 exposing common wheat (*Triticum aestivum* L.) to enriched CO₂ levels. Converted to a +300ppm common scale the average growth benefit was +67.6 percent. Blandino (2020) measured both the yield and nutritional quality of an “improver” hybrid wheat variety and its parents under elevated CO₂ levels (+166 ppm). They reported a grain yield increase of +16 percent but a 7 percent decrease in grain protein levels. But they found that the food quality of different wheat varieties responded differently to elevated CO₂ levels, so that with proper varietal selection, growers could select wheat types that best take advantage of the elevated CO₂.

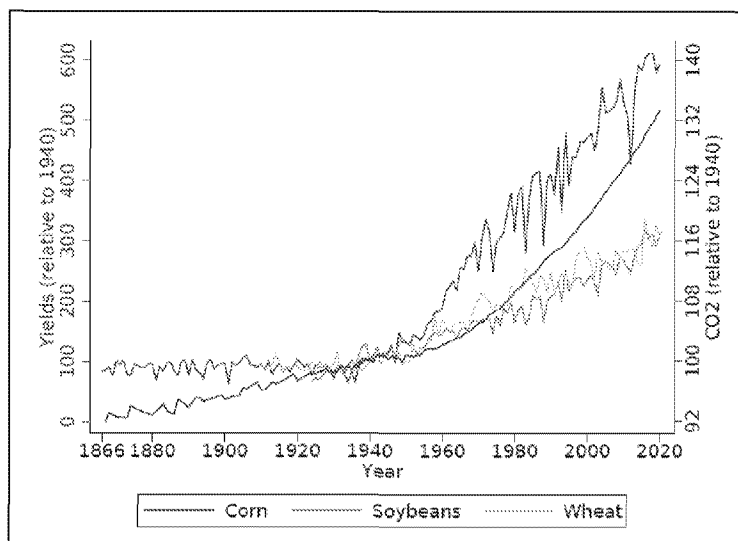


Figure 9.1: U.S. average CO₂ levels and yields of corn, soy and wheat all normalized so 1940=100. Source: Taylor and Schlenker (2021)

Further evidence

A 2021 report from the U.S. National Bureau of Economic Research (Taylor and Schlenker 2021) used satellite-measured observations of outdoor CO₂ levels across the United States, matched to county-level agricultural output data and other economic variables. After controlling for the effects of weather, pollution and technology the authors concluded that CO₂ emissions had boosted U.S. crop production since 1940 by 50 to 80 percent, attributing much larger gains than had previously been estimated using FACE experiments. They found that every ppm of increase in CO₂ concentration boosts corn yields by 0.5 percent, soybeans by 0.6 percent, and wheat by 0.8 percent.

Beyond growth benefits, extra CO₂ boosts plant resilience to dryness. Deryng *et al.* (2016) surveyed evidence on crop water productivity (CWP, the yield per unit of water used), drawing attention to the potential for CO₂ both to enhance photosynthesis and reduce leaf-level transpiration (water loss during leaf respiration). They surveyed all available FACE data on crop yield changes for maize (corn), wheat, rice and soybean, and combined it with crop model data simulating yield responses as of 2080 under the extreme RCP8.5 scenario in four growing regions (Tropics, Arid, Temperate and Cold) each of which were split into rainfed and irrigated sub-regions. In every region they reported that models without CO₂ fertilization predicted CWP losses but CO₂ fertilization more than offset them; once fertilization was taken into account, all regions showed a net CWP gain. Deryng *et al.* also reported that negative yield impacts on wheat and soybean were fully offset by CWP gains and mitigated by up to 90 percent for rice and 60 percent for maize. Similarly, Cheng *et al.* (2017) noted that increased global plant growth from 1982 to 2011 due to rising CO₂ uptake was accompanied by such large gains in CWP that despite the extra biomass global water use by plants had not increased.

Deryng *et al.* (2016) assumed that climate change would “exacerbate water scarcity”. It is noteworthy that while models predict drylands will expand under climate warming, observations show the opposite: greening is happening even in arid areas. Zhang *et al.* (2024) report that due to increased CO₂ levels